

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE DOUTORADO**

**DEMANDA HÍDRICA DE CACAUEIRO IRRIGADO E
CONDUZIDO A PLENO SOL EM TABULEIRO COSTEIRO
DO RECÔNCAVO DA BAHIA**

Gerlange Soares da Silva

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA
2020**

**DEMANDA HÍDRICA DE CACAUEIRO IRRIGADO E CONDUZIDO A
PLENO SOL EM TABULEIRO COSTEIRO DO RECÔNCAVO DA
BAHIA**

Gerlange Soares da Silva

Tecnóloga em Irrigação e Drenagem

Instituto Federal do Ceará, 2011

Mestra em Solos e Qualidade de Ecossistemas

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2014

Tese apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola (Área de Concentração: Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos)

Orientador: Prof. Dr. Francisco Adriano de Carvalho Pereira

**CRUZ DAS ALMAS- BAHIA
2020**

FICHA CATALOGRÁFICA

S719d

Silva, Gerlange Soares da

Demanda hídrica de cacauzeiro irrigado e conduzido a pleno sol em Tabuleiro Costeiro do Recôncavo da Bahia / Gerlange Soares da Silva. Cruz das Almas, BA, 2020.

106f.; il.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Adriano de Carvalho Pereira

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrária, Ambientais e Biológicas, Doutorado em Engenharia Agrícola

1. Cultivo do Cacau. 2. Tecnologia de Produção 3. Recôncavo da Bahia. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrária, Ambientais e Biológicas. II.Título.

CDD: 633.74

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE DOUTORADO**

**DEMANDA HÍDRICA DE CACAUEIRO IRRIGADO E CONDUZIDO A
PLENO SOL EM TABULEIRO COSTEIRO DO RECÔNCAVO DA
BAHIA**

Comissão Examinadora da Defesa de Tese de
Gerlange Soares da Silva

Aprovada em 12 de fevereiro de 2020

Prof. Dr. Francisco Adriano de Carvalho Pereira
Universidade federal do Recôncavo da Bahia / UFRB
(Orientador)

Prof. Dr. Luciano da Silva Souza
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia / UFRB
(Examinador Interno)

Dr. Rafael Dreux Miranda Fernandes
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (PNPD/UFRB)
(Examinador Externo)

Prof. Dr. Luís Fernando de Souza Magno Campeche
Instituto Federal de Pernambuco / IFPE
(Examinador Externo)

Dra. Jucicleia Soares da Silva
Embrapa Semiárido
(Examinador Externo)

DEDICATÓRIA

À minha mãe Liduína Soares da Silva (in memorian).

Ao meu avô José Serafim da Silva (in memorian).

À minha avó Laura Lima da Silva (in memorian).

Aos meus primos Edney Lima da Silva e Anderson Lima da Silva (in memorian)

Minha homenagem

Dedico

À minha mãe Liduína Soares da Silva, por todo apoio, amor e compreensão que fez com que essa etapa chegasse até aqui.

Aos meus avôs José Jacó Lima da Silva e Josefa Soares da Silva, por todo amor e carinho.

Ofereço

Ao meu companheiro, amigo e confidente Alex Santana do Rosário.

Aos meus irmãos José Soares da Silva, Derlange Soares da Silva, Jeane Soares da Silva, Bruno Lima da Silva, Victor Lima da Silva, Maiara Soares da Silva e Alex Sandro Santos Araújo, pela amizade, amor, cumplicidade e compreensão em todas as etapas da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que nunca me abandonou mesmo nos momentos mais difíceis, sendo meu amparo e refúgio, me dando forças para essa longa jornada.

À Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, em especial à Coordenação de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade da realização deste curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), pelo custeio do experimento e pelo financiamento da bolsa de estudos.

À minha mãe Liduina Soares da Silva, por todo amor e dedicação que sempre teve por mim, por nunca me deixar fraquejar e sempre me fazer acreditar que o impossível não existe para quem luta pelos seus sonhos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Francisco Adriano de Carvalho Pereira, pela sua orientação, colaboração e apoio em todas as etapas desse trabalho e durante o curso de doutorado.

Ao meu namorado Alex Santana do Rosário, por toda dedicação, apoio e colaboração antes durante e após o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu amigo e parceiro Edilson Bastos, por todo seu apoio e colaboração em todas as etapas de desenvolvimento desse trabalho, que nunca medi esforços para me ajudar; pessoa dedicada, a quem confiei e confio meus projetos, e serei eternamente grata, principalmente por sua amizade verdadeira, que me proporcionou muitos ensinamentos.

Aos meus colegas de turma do programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFRB Irai Manuela Santana Santos, Peterson Costa Conceição Silva e Alan Del Carlos.

Aos colegas do programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFRB, em especial Oswaldo Palma Lopes Sobrinho, Aline Bezerra de Sousa, Stephanie Soares Arriero, Lucas dos Santos Batista, Maria Magali Mota dos Santos, Evellyn Freire da Silva, Thais Nascimento Meneses, e Francisco José Nunes Modesto, a quem sempre recorri e recebi todo apoio necessário para a realização desse trabalho.

Aos estagiários Rodrigo Almeida Santana, pelo seu apoio e dedicação em todas as etapas da realização deste trabalho; Rafael e Elen pela ajuda em campo e em laboratório na fase final do desenvolvimento deste trabalho.

À minha colega, parceira e amiga Jucicléia Soares da Silva, pela confiança e toda sua dedicação aos nossos projetos e principalmente por sua amizade e orientações.

Aos professores Thomas Vincent Gloaguen, Luciano da Silva Sousa, Oldair Del'Arco Vinhas Costa, Julio Cesar Azevedo Nobrega, Anacleto Ranulfo dos Santos e Marcela Rebouças Bomfim, pelos ensinamentos, colaboração, apoio e

amizade, parceiros a quem sempre recorri e me ampararam desde que os conheci.

Ao Ailton Boa Sorte, servidor da UFRB atuando no Laboratório de Física do Solo, por seu apoio técnico, que sem ele não seria possível a realização das análises físico-hídricas do solo.

Aos professores do programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da UFRB pelos ensinamentos, apoio e amizade Aureo Silva de Oliveira, Eugenio Ferreira Coelho, Tales Miler Soares, Vital Pedro da Silva Paz, Hans Raj Gheyi, André Dias Azevedo Neto e, em especial, aos professores Lucas Melo Vellame, Maurício Antônio Coelho Filho e Alisson Jadavi Pereira da Silva, que muito contribuíram ao longo do desenvolvimento e escrita deste trabalho.

Aos examinadores por se disporem a contribuir com a melhoria deste trabalho.

O meu sincero agradecimento!

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AIPC - Associação Nacional das Indústrias de Cacau

AF - Área foliar

Am - Quente úmido

Ap - Altura da planta

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CEPEC - Centro de Pesquisa do Cacau

CEPLAC - Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira

% - Por cento

C - Comprimento

°C - Graus Celsius

cm - Centímetro

CO² - Dióxido de carbono

C.Planta - Crescimento da planta

D - Drenagem

DAT - Dias após o transplante

Dc - Diâmetro do caule

D.Fruto - Desenvolvimento do fruto

Dr. - Doutor

Dra. - Doutora

Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ETc- Evapotranspiração da Cultura

ETP - Evapotranspiração potencial

ETo - Evapotranspiração de referência

ET - Evapotranspiração

ETr - Evapotranspiração real

ea - Pressão de vapor atual d'água do ar

EVCA - Evaporação do tanque classe A

es- Pressão de saturação do vapor d'água do ar

FAPESB - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia

FAO - *Food and Agriculture Organization*

G - Densidade do fluxo de calor no solo

g - Grama

ha- Hectare

ICCO - Organização Internacional do Cacau
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFPE - Instituto Federal de Pernambuco
K - Fator de correção
Kc - Coeficiente da cultura
K₀ - Condutividade hidráulica saturada
KPa - Quilopascal
KPa ° C⁻¹ - Quilopascal por Grau Celsius
Kg - Quilograma
I - Lâmina
L - Largura
m - Metro
mm - Milímetro
m² - Metro quadrado
m s⁻¹ - Metro por Segundo
mm - Milímetro
mm ano⁻¹ - Milímetro por ano
mm dia⁻¹ - Milímetro por dia
min - Minuto
MJ - Megajoule
MJ m⁻² dia⁻¹ - Megajoule por metro quadrado por dia
mV - Milivolt
Max - Máximo
Med - Média
Min - Mínimo
M.F.Fruto - Maturação fisiológica do fruto
P - Precipitação
Pp - Precipitação pluviométrica
Prof. - Professor
Rg - Radiação global
Rn - Saldo de radiação
s - Segundo
T - Temperatura do ar
t - Tonelada
T.C.A - Taxa de crescimento absoluto

TDR - Reflectometria no Domínio do Tempo

t ha⁻¹ ano⁻¹ - Toneladas por hectare por ano

Tm - Temperatura média do ar

U₂ - Velocidade do vento

UFRB - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Ur - Umidade relativa do ar

US\$ - Dólar

V - Volt

γ - Coeficiente psicrométrico

Δ - Declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água

ΔML - Variação de massa do lisímetro

Ψ_w - Potencial hídrico

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cultivo de cacau clonal - CCN 51 em uma caixa lisimétrica (A) instalada sobre quatro células de carga (B).	37
Figura 2. Processo de calibração do conjunto lisimétrico.....	39
Figura 3. Resposta da balança aos incrementos e retiradas de massas aplicadas no lisímetro.....	41
Figura 4. Relação entre massa aplicada e mensurada nos ciclos de carregamento e descarregamento da calibração do lisímetro com uma planta jovem de cacau. 41	
Figura 5. Erro entre massas mensuradas e aplicadas durante a calibração do lisímetro de pesagem cultivado com uma planta jovem de cacau.....	42
Figura 6. Erros de repetitividade (a), incerteza a 95% (b) e histerese (c) na obtenção das massas mensuradas em relação às massas aplicadas no processo de calibração do lisímetro de pesagem, cultivado com uma planta jovem de cacau.....	43
Figura 7. Sensibilidade no conjunto lisimétrico às mudanças de massa durante um dia com precipitação e drenagem para o dia 1 de agosto de 2017.....	45
Figura 8. Variação de massa no lisímetro no dia 1 de março de 2017, sem a ocorrência de precipitação e irrigação em relação às condições meteorológicas radiação (a) e velocidade do vento (b) e variação de massa para o dia 18 de março de 2017, com precipitação (c) e drenagem constante.....	46
Figura 9. Lâmina evapotranspirada pela planta de cacau em intervalos de uma hora para o dia 2 de outubro de 2017, com ausência de precipitação e irrigação em relação à demanda evaporativa do ar (a) e lâminas evapotranspiradas para o dia 18 de março com irrigação e drenagem constantes (b).	48
Figura 10. Croqui da área experimental.	58
Figura 11. Evapotranspiração de plantas jovens de cacau e evapotranspiração de referência no ano de 2017.	63
Figura 12. Demanda hídrica de cacau irrigado e conduzido no sistema de monocultivo a pleno sol e demanda atmosfera no tempo.	64
Figura 13. Área foliar do cacau em função da evapotranspiração de referência..	68
Figura 14. Distribution of sampling points in the study area.....	79
Figura 15. Map of isolines of the saturated hydraulic conductivity under cocoa cultivation in layers 0.15–0.30 m (A) and 0.30–0.45 m (B).....	85

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Valores totais de precipitação e valores médios da demanda evaporativa do ar durante um ano do ciclo de produção de cacau jovem irrigado por micro aspersão no sistema de monocultivo a pleno sol em Cruz das Almas, Bahia, Brasil. 60
- Tabela 2. Valores totais, médio, máximos e mínimos da evapotranspiração da cultura do cacau e da evapotranspiração de referência durante um ano do ciclo de produção da cultura irrigada por microaspersão no sistema de monocultivo a pleno sol em Cruz das Almas, Bahia, Brasil..... 61
- Tabela 3. Valores médios das variáveis nas fases de crescimento e produção da cultura do cacau para o ano de 2017. 65
- Tabela 4. Comportamento do coeficiente de cultura (K_c) obtidos através da relação E_{Tc} e E_{To} para plantas jovens de cacau no período de janeiro à dezembro de 2017. 69
- Tabela 5. Parameters of descriptive analysis of physical soil water attributes in cocoa cultivation in the Recôncavo Baiano, saturated hydraulic conductivity (K_0), soil density (D_s), macro (M_a), micro (m_i) and total porosity (P_t)..... 82
- Tabela 6. Analysis parameters of semivariographic values of the saturated hydraulic conductivity under cocoa cultivation in Recôncavo Baiano. 84

DEMANDA HÍDRICA DE CACAUEIRO IRRIGADO E CONDUZIDO A PLENO SOL EM TABULEIRO COSTEIRO DO RECÔNCAVO DA BAHIA

RESUMO: O manejo eficiente da água é extremamente importante para o desenvolvimento de cacau, pois a limitação no solo reduz a sua produtividade. Razão pela qual, se faz necessário o conhecimento da demanda hídrica da cultura. Portanto, objetivou-se determinar a demanda de água pela cultura do cacau, utilizando como método de medida, lisímetro de pesagem baseado em quatro células de carga e, caracterizar a distribuição espacial da condutividade hidráulica saturada em Latossolo Amarelo Distrocoeso do Tabuleiro Costeiro do Recôncavo da Bahia. Na área experimental de 4.868,9 m² do Programa de Pós-Graduação em Engenharia agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia em Cruz das Almas, foram cultivadas 530 plantas da variedade CCN 51, espaçadas em três metros e irrigadas pelo sistema de microaspersão. No centro da área, uma das plantas foi cultivada em um lisímetro de pesagem de 1,44 m de superfície, e nela foi monitorado o consumo de água da cultura, no período de 1 de janeiro de 2017 a 30 de dezembro de 2017. Realizou-se a calibração do conjunto lisimétrico com o objetivo de avaliar erros de medidas atribuídos a esse instrumento e sua adequação a determinação da demanda hídrica da cultura do cacau. Os dados foram coletados utilizando um datalogger programado para efetuar leituras a cada 01 segundo, com armazenamento das médias de 15 minutos. Realizou-se a calibração entre 3:00 e 5:00 horas da manhã, com adição/retirada de massas conhecidas em intervalos de 02 minutos; por meio da regressão linear entre o sinal elétrico em mV e as massas em kg, obteve-se a curva de calibração e posteriormente foram calculados os erros de medidas e o funcionamento do lisímetro. Os coeficientes de determinação das curvas de calibração foram superiores a 0,9, e os erros absolutos, incerteza, histerese, repetitividade e a exatidão do instrumento foram respectivamente 0,179 kg e -0,044 kg; 0,077 kg; 0,031 kg e 0,044 kg e de 0,1 kg mostraram não interferir no cômputo da demanda hídrica do cacau, comprovando que o instrumento de medidas afere com exatidão a evapotranspiração da cultura (ET_c). Após essa análise, e com o objetivo de avaliar a demanda hídrica de plantas jovens de cacau cultivadas em campo, determinando a ET_c e o coeficiente de cultivo (K_c) durante o ciclo de crescimento e produção; as medidas foram realizadas diariamente, sendo a ET_c determinada pelo balanço de massa e o K_c pela razão da ET_c e evapotranspiração de referência (ET_o) calculada com a equação Penman-Monteith. A taxa anual da ET_c foi de 800,68 mm com média diária de 3,8 mm e o K_c médio de 0,92. A demanda hídrica de plantas jovens de cacau mostrou o quanto exigente em água a cultura é, sendo que nas fases de crescimento e maturação fisiológica do fruto a ET_c foi maior em relação as fases de floração, desenvolvimento e enchimentos do fruto. Realizou-se ainda, estudos para avaliar os atributos físico-hídricos, com objetivo de caracterizar e modelar a variabilidade espacial da condutividade hidráulica saturada (K_o). Nesse estudo foi realizada

amostragem de solo na estrutura indeformada em 50 pontos espaçados de 8,0 em 8,0 m, em três profundidades 0,0-0,15 m, 0,15-0,30 m e 0,30-0,45 m. Determinou-se em laboratório a K_0 utilizando permeâmetro de carga constante, distribuição de poros utilizando mesa de tensão e a densidade do solo. Os valores médios da K_0 nas profundidades avaliadas foram respectivamente 40,41 mm h⁻¹, 26,49 mm h⁻¹ e 37,82 mm h⁻¹ e o modelo gaussiano foi o que melhor se ajustou ao conjunto de dados. A K_0 apresentou forte dependência espacial, sendo um atributo importante na delimitação de zonas homogêneas para fins de manejo sítio específicos.

Palavras-chave: *Theobroma cacao* L. Consumo hídrico. Evapotranspiração. Manejo eficiente de água e solo.

WATER DEMAND OF COCOA IRRIGATED AND CONDUCTED A FULL SUN IN AN COASTAL TABLELANDS OF THE RECÔNCAVO DA BAHIA

ABSTRACT: Efficient water management is extremely important for the development of cocoa, as the limiting in the soil reduces its productivity. Therefore, it is necessary to know the water demand of the crop. Therefore, the aim was to determine the water demand for the cocoa crop, using the weighing lysimeter as a measurement method based on four load cells, and to characterize the spatial distribution of the saturated hydraulic conductivity in an Oxisol of the Recôncavo da Bahia Coastal Tablelands. In the experimental area of 4,868.9 m² of the Postgraduate Program in Agricultural Engineering of the Universidade Federal do Recôncavo da Bahia in Cruz das Almas, 530 plants of the variety CCN 51 were grown, spaced at three meters and irrigated by the micro sprinkler system. In the center of the area, one of the plants was grown in a 1.44 m surface lysimeter and the water consumption of the crop was monitored in the period from January, 1 of 2017 to December, 30 of 2017. Calibration of the lysimetric set was carried out in order to evaluate measurement errors attributed to this instrument and its adequacy to determine the water demand of the cocoa crop. The data were collected using a datalogger programmed to perform readings every 01 second, with storage of the averages of 15 minutes. Calibration was carried out between 3:00 and 5:00 am, with the addition / removal of known masses at 02-minute intervals; by means of the linear regression between the electrical signal in mV and the masses in kg, the calibration curve was obtained and subsequently the measurement errors and the operation of the lysimeter were calculated. The coefficients of determination of the calibration curves were greater than 0.9, and the absolute errors, uncertainty, hysteresis, repeatability and the accuracy of the instrument respectively 0.179 kg and -0.044 kg; 0.077 kg; 0.031 kg and 0.044 kg and 0.1 kg were found not to interfere in the calculation of water demand for cocoa, proving that the measurement instrument accurately measures the crop evapotranspiration (ET_c). After this analysis, and with the objective of evaluating the water demand of young cocoa plants grown in the field, determining ET_c and the cultivation coefficient (K_c) during the growth and production cycle; measurements were performed daily, with ET_c determined by mass balance and K_c by ET_c ratio and reference evapotranspiration (ET_o) calculated with the Penman-Monteith equation. The annual rate of ET_c was 800.68 mm with a daily average of 3.8 mm and the average K_c of 0.92. The water demand of young cocoa plants showed how demanding the crop is in water, and in the phases of growth and physiological maturation of the fruit, ET_c was greater in relation to the phases of flowering, development and fruits filling. Studies were also carried out to evaluate the physical-hydraulic attributes, with the objective of characterizing and modeling the spatial variability of the saturated hydraulic conductivity (K_o). In this study, soil sampling was performed on the undisturbed structure at 50 points spaced from 8.0 to 8.0 m, in three depths 0.0-0.15 m, 0.15-0.30 m and 0.30-0, 45

m. In the laboratory, the K_0 was determined using a constant head permeameter method, pore distribution using a tension table and soil density. The average K_0 values at the depths evaluated were 40.41 mm h^{-1} , 26.49 mm h^{-1} and 37.82 mm h^{-1} , respectively, and the Gaussian model was the one that best fitted the data set. K_0 showed strong spatial dependence, being an important attribute in the delimitation of homogeneous zones for specific site management purposes.

Keywords: *Theobroma cacao* L. Water consumption. Evapotranspiration. Efficient water and soil management.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	VIII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XII
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XV
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. OBJETIVOS	4
3. REVISÃO DE LITERATURA	5
3.1. A cultura cacaueteira	5
3.2. Importância da atividade cacaueteira	6
3.3. O cacaueteiro e sua relação com o ambiente de cultivo	8
3.4. Estratégias para melhorar a produção e reduzir a incidência de pragas e doenças	10
3.5. Demanda de água pela cultura do cacau	12
3.6. Evapotranspiração de culturas agrícolas e os fatores que a afetam	15
3.7. Métodos de determinação da evapotranspiração	17
3.7.1. Penman-Monteith	18
3.7.2. Lisimetria de pesagem	19
3.7.3. Balanço hídrico de campo	21
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22
CAPITULO 1	33
ANÁLISE DE ERRO EM LISÍMETRO DE PESAGEM PARA AVALIAÇÃO DA DEMANDA HÍDRICA DE CACAUEIRO	33
RESUMO	34
ABSTRACT	34
INTRODUÇÃO	35
MATERIAL E MÉTODOS	36
RESULTADOS E DISCUSSÃO	40

CONCLUSÕES	50
AGRADECIMENTOS	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
CAPÍTULO 2	54
EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTIVO DO CACAU CULTIVADO A PLENO SOL NO RECÔNCAVO DA BAHIA	54
RESUMO	55
ABSTRACT	55
INTRODUÇÃO	56
MATERIAL E METODOS	58
RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
CONCLUSÕES	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
CAPÍTULO 3	74
SPATIAL VARIABILITY OF THE SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SOIL IN COCOA FARMING IN RECÔNCAVO BAIANO	74
ABSTRACT	75
RESUMO	76
INTRODUCTION	76
MATERIAL AND METHODS	78
RESULTS AND DISCUSSION	81
CONCLUSIONS	86
ACKNOWLEDGMENTS	86
REFERENCES	86
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	90

1. INTRODUÇÃO GERAL

A atividade cacauera é largamente desenvolvida nas regiões úmidas tropicais do mundo, do gênero *Theobroma*, a espécie *Theobroma cacao* L. torna-se a mais importante, pois, seu cultivo é realizado em vários continentes, sendo mais explorada na África, América e Ásia (SOLORZANO et al., 2015). Concentram-se no continente africano 74,6% da oferta mundial de amêndoas do cacau, em que Costa do Marfim e Gana respondem por mais de 60,0% (ICCO, 2018).

O Brasil, apesar de já ter sido o segundo maior produtor de cacau do mundo (FRANCK et al., 2017), atualmente oferta apenas 4,0% e ocupa a sétima posição na lista dos maiores produtores de amêndoas (ICCO, 2018), com uma produção de 247.730 toneladas na safra de 2018/2019 (IBGE, 2019).

Mesmo assim, está conseguindo se restabelecer, expandindo o cultivo para outras áreas do país, como Rio de Janeiro, Minas Gerais, Rio Grande do Norte, Sergipe, Ceará e Espírito Santo. Atualmente, no Brasil, são mais de 70.000 propriedades rurais desenvolvendo a atividade cacauera, em que 90% estão nos estados da Bahia e do Pará.

A Bahia, que na safra de 2015/2016 tinha perdido o posto de primeiro lugar na produção nacional para o Pará, devido à estiagem que atingiu a lavoura, voltou a liderar a oferta nacional nas safras de 2017/2018 e 2018/2019, com uma produção de 122.568 e 119.718 toneladas respectivamente (IBGE, 2019); e segue avançando para novamente voltar a competir por uma posição de destaque na produção mundial, alcançada anteriormente ao agravamento dos problemas fitossanitários.

A renda brasileira na cadeia produtiva do cacau e chocolate fechou em 2017 em R\$ 21,62 bilhões. Só a produção de cacau rendeu R\$ 1,47 bilhões; apesar da redução de 16,4% em relação ao ano de 2015, a atividade cacauera é bastante lucrativa, principalmente após agregação de valores ao produto final (LEITE, 2018).

Portanto, para tornar a produção brasileira crescente se faz necessário investir em novas tecnologias e estratégias que, por sua vez, requerem conhecimentos específicos para o sucesso de sua implantação. Um exemplo é a demanda hídrica da cultura, já que as plantas de cacau reduzem sua

produtividade quando submetidas à limitação ou excesso de água no solo. Essas informações auxiliam os produtores na tomada de decisões, permitindo manejar, de forma eficiente, a água de irrigação.

O cultivo de cacau irrigado em regiões não tradicionais, além de alcançar altas produtividades, reduz o desenvolvimento de doenças, principalmente quando o método de irrigação é localizado. E, por ser uma cultura cultivada tradicionalmente em ambientes úmidos, sem irrigação, as informações sobre a demanda de água das plantas não aparece na literatura; no entanto, são extremamente necessárias para o correto planejamento, dimensionamento e manejo da irrigação.

As necessidades hídricas do cacauzeiro, assim como das demais outras culturas, podem ser determinadas por métodos diretos e indiretos. Na literatura, vários trabalhos foram realizados utilizando métodos baseados no monitoramento de água no solo; calculando o balanço hídrico em um determinado volume de solo; métodos lisimétricos de pesagem, drenagem e lençol freático; utilizando os dados agrometeorológicos como razão de Bowen, aerodinâmico e o de Penman-Monteith (SANTOS et al., 2017).

Dentre esses, a lisimetria de pesagem é considerada um método padrão, utilizado como referência para avaliar os demais métodos; além disso, serve para calibrar e validar modelos de estimativas da ET_c para plantas distintas (FLUMIGNAN, 2011). É um método no qual as medidas da ET_c são determinadas de forma direta (VELLAME et al., 2012) e em períodos de tempo curtos, até mesmo inferiores a uma hora (NASCIMENTO et al., 2011). Além disso, os lisímetros de pesagem são considerados precisos, uma vez que é utilizado todo um aparato tecnológico (NASCIMENTO et al., 2016).

Portanto, devido à falta ou pouca disponibilidade de informações relacionadas às necessidades hídricas da cultura do cacau, muitos produtores podem vir a ser mal orientados quanto ao manejo de água. A carência dessas informações pode levar a projetos de irrigação sub ou super dimensionados, expressando isso em retornos econômicos insuficientes, justificando assim o descrédito da cultura por parte do produtor.

Portanto, vê-se a necessidade de mais estudos sobre as perdas de água pela cultura do cacau em seu ambiente de cultivo, o que reforça ainda mais a

importância das determinações da ET e seu Kc, podendo ser realizadas utilizando-se as metodologias mencionadas.

Buscando por aumento de produção, uma das estratégias que vem sendo utilizada pelos produtores é a utilização de materiais geneticamente modificados e, o cultivo de plantas a pleno sol. Esses modelos tornaram-se uma alternativa para melhorar à produção nacional, e já vem sendo utilizados no sul da Bahia, com o incremento da fertirrigação, que inclusive são praticados nos plantios comerciais do semiárido brasileiro, extremo-sul da Bahia e norte do Espírito Santo. Ou seja, a atividade vem se modernizando e adotando tecnologias associadas também a novas formas de plantio.

Das regiões no país que apresentam potencial para a expansão da cacauicultura, os Tabuleiros Costeiros do sul da Bahia e Espírito Santo são os que já têm implantados com sucesso projetos comerciais, com o uso intensivo de tais tecnologias. As demais regiões estão com unidades de validação/observação. Porém, informações do consumo hídrico do cacau em seu ambiente de cultivo são escassas, e são elas que ajudam a tornar a produção rentável, uma vez que se conhecendo a demanda hídrica da cultura, é possível manejar adequadamente a irrigação.

Outro ponto não menos importante, que possibilita o cultivo do cacau em várias regiões, é o conhecimento dos atributos do solo, principalmente os físico-hídricos, que somam para o sucesso na implantação de quaisquer estratégias para o aumento da produção da cultura.

Para o cultivo de cacau, os solos férteis e profundos são os mais recomendáveis, e partindo do pressuposto de que os Tabuleiros Costeiros também são unidades de cultivo da cultura, em que os solos apresentam características físicas e químicas, diferente das recomendadas para a sua produção; avaliar os atributos físicos e hídricos é fundamental para que os produtores possam manejar os insumos adequadamente, visto que poucas são as informações sobre as inter-relações solo-água-plantas-atmosfera, avaliada por meio desses atributos.

A variabilidade da condutividade hidráulica, seja ela, espacial e/ou temporal, horizontal e vertical, influencia a produtividade do cacau; técnicas de geoestatística são utilizadas na determinação do grau de dependência espacial desse atributo, e com o delineamento diferenciado das zonas de manejo sítio

específico, ou seja, diferentes locais da mesma área que apresentam características homogêneas, a produtividade do cacau aumenta, devido à eficiência no uso de insumos agrícolas (LUCHIARI JR et al., 2011).

O cômputo dessas informações poderá orientar os produtores no planejamento para o uso de sistema de irrigação adequado para os solos a serem cultivados (FONSÊCA et al., 2007), uma vez que dos atributos do solo, o que mais influencia o fluxo de água é a condutividade hidráulica (K_0) que, por sua vez, representa a facilidade com que o solo deixa o fluido ser conduzido (GONÇALVES; LIBARDI, 2013).

A caracterização hídrica do solo, a adoção de técnicas de determinação direta da demanda de água pela cultura, utilizando lisímetro de pesagem, possibilita o manejo mais eficiente da irrigação, sendo um método que determina com confiabilidade a ET_c e, por consequência, cálculos precisos do K_c , e isso, permite conhecer o papel do fator hídrico no crescimento, e desenvolvimento de plantas de cacau.

2. OBJETIVOS

Geral:

Determinar a demanda de água pela cultura do cacau, utilizando, como método de medida, lisímetro de pesagem baseado em células de carga e, caracterizar a distribuição espacial da condutividade hidráulica saturada em Latossolo Amarelo Distrocoeso do Tabuleiro Costeiro do Recôncavo da Bahia.

Específicos:

- i) Avaliar a adequação do lisímetro de pesagem à determinação da demanda hídrica de plantas jovens de cacau.
- ii) Determinar a evapotranspiração de cacaueiro jovem por meio do balanço de massa, utilizando lisímetro de pesagem baseado em células de carga;
- iii) Determinar os coeficientes de cultivo de plantas jovens de cacau em suas fases de crescimento e produção;
- iv) Relacionar a demanda hídrica da cultura do cacau com a demanda atmosférica;

- v) Avaliar as relações entre a demanda hídrica da cultura com o seu desenvolvimento.
- vi) Caracterizar a variabilidade espacial da condutividade hidráulica saturada em Latossolo Amarelo Distrocoeso cultivado com Cacau no Tabuleiro Costeiro do Recôncavo da Bahia;

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. A cultura cacaeira

O cacau (*Theobroma cacao* L.) é uma planta arbórea, perene, pertencente à família Malvaceae e subfamília Sterculiaceae, em que a origem está entre as bacias dos rios Amazônia, Orinoco e as Guianas. Sua espécie é uma das 22 pertencentes ao gênero *Theobroma*, em que sua importância se dá devido à larga exploração comercial que, por sua vez, ocorre em várias regiões do mundo (SINDONI, 2006; SÁNCHEZ, 2011).

O cultivo de plantas de cacau por muitos anos foi realizado nos sistemas cabruca e floresta, em que, nesse último, o consórcio ocorria principalmente com a seringueira. A razão pela qual era realizado nesses sistemas é que o cacau se desenvolve bem em ambientes nos quais as temperaturas não variam tanto, ficando em média de 25°C; além disso, a precipitação anual de 1.500 a 2.500 mm, com distribuição bem definida nas regiões produtoras, era outro fator que fazia com que os produtores investissem nesses tipos de cultivo (SILVA NETO et al., 2001; SÁNCHEZ, 2011; VALLE, 2012; CEPLAC, 2018a).

De acordo com os autores supracitados, a planta tem como características um sistema radicular pivotante, que pode chegar a atingir 2,0 m de profundidade, e um sistema radicular efetivo localizado próximo à superfície do solo, logo nos primeiros 30,0 cm, e sua função é a nutrição das plantas. O caule da planta também se apresenta como outra característica interessante. Nos primeiros dois anos de cultivo seu crescimento é ereto, sua casca lisa e de cor verde que com o passar do tempo, muda para cinza-escuro (SILVA NETO et al., 2001; SÁNCHEZ, 2011; VALLE, 2012; CEPLAC, 2018a).

As folhas são pecioladas, com dois intumescimentos conhecidos como pulvínulos, localizada entre o caule e o limbo foliar. Quando nascem apresentam, na maioria das plantas, cor avermelhada, porém são muito variáveis e também

podem apresentar a cor verde-esbranquiçada, ou roxa, e quando maduras apresentam cor verde-escura. Seu tamanho pode chegar a 30,0 cm ou mais, a depender da intensidade luminosa (SILVA NETO et al., 2001; BARTLEY, 2005; SÁNCHEZ, 2011; VALLE, 2012; CEPLAC, 2018a).

O cacaueteiro emite flores de cor amarelo-avermelhada, e seu tamanho varia entre 5,0 e 6,0 mm de largura; além disso, são hermafroditas. Geralmente contêm cinco sépalas, cinco pétalas, cinco estames e ovários com cinco carpelos unidos e contam com bráctea e estaminóides, em que a produção de óvulos pode chegar a 77 unidades. A inflorescência das plantas é do tipo cauliflora, ou seja, as plantas emitem flores nos tronco e ramos e com muita intensidade (DIAS, 2001; SCHAWWE et al., 2013).

Os frutos do cacaueteiro são uma drupa pentalocular indeiscente, com até 30 cm de comprimento. A sua cor varia entre o verde, vermelho e marrom, mudando na maturação, cuja ela depende da variedade. A superfície pode variar de lisa a áspera, apresentando sulcos longitudinais (PIRES, 2003; BARTLEY, 2005; MONTEIRO; LOPES; CLEMENT, 2009). A variabilidade dos frutos, em tamanho, cor e número de amêndoas, assim como o aumento na sua qualidade nos últimos anos tem como responsável o incremento de novas tecnologias, tais como os cruzamentos dos híbridos que ocorrem entre os grupos Criollo, Forasteiro e Trinitário (ALEXANDRE et al., 2015), sendo suas características químicas e físicas e também de suas sementes e polpa influenciadas pelo ambiente e pela genética (TUCCI et al., 1996; MELO; CHITARRA, 1999; ÁLVAREZ; PEREZ; LARES, 2002; ALMEIDA; DIAS; SILVA, 2009).

3.2. Importância da atividade cacaueteira

A principal matéria-prima do cacaueteiro são as sementes, destinadas principalmente à fabricação de chocolate (FEDECACAO, 2015; MODA; BOTEON; RIBEIRO, 2019). A polpa é bastante requerida e seu principal uso é o consumo *in natura*. Ambas são utilizadas na fabricação de vinho, vinagre, licor e geléia (MENEZES; CARMO-NETO, 1993; ALMEIDA; VALLE, 2007; CARR; LOCKWOOD, 2011). Das sementes também são extraídas a manteiga, muito utilizada nas indústrias farmacêuticas e de cosméticos e, segundo a Euromonitor

(2016), até 2020 seu consumo juntamente ao licor e pó equivalerá a 3,7 milhões de toneladas.

A comercialização das amêndoas de cacau tornou a atividade de grande importância econômica e social, sendo a base para o sustento de mais de 40 milhões de pessoas em 50 países (RESTREPO; ROJAS; PISCO, 2017; COCOA WORLD FOUNDATION, 2018).

Seu cultivo é realizado em mais de oito milhões de hectares e a produção anual é em média 4,5 milhões de toneladas (EUROMONITOR, 2016; COCOA WORLD FOUNDATION, 2018). A atividade é desenvolvida por mais de seis milhões de pequenos produtores que, juntos, respondem por mais de 90% da produção mundial, gerando assim, receita anual de 12 bilhões de dólares (ICCO, 2015).

No Brasil, o cultivo de cacau é responsável por 4,0% da produção mundial e sua exploração no país responde pela sobrevivência de mais de três milhões de pessoas, com a maior produção concentrada nos estados do Pará e da Bahia (ICO, 2018; LEITE, 2018; IBGE, 2019).

Na Bahia, a atividade cacaeira alimenta a economia em praticamente 100 municípios e seu cultivo é praticado por 56.000 produtores em 450.045 ha (IBGE, 2019; MAPA, 2019), sendo uma atividade importantíssima para esse estado, principalmente para a região Sul em que se consolidou.

Nessa região, a atividade cacaeira foi a principal responsável pela transformação de uma vila conhecida como São Jorge dos Ilhéus para a atual Cidade de Ilhéus. A cacauicultura responde pelo desenvolvimento econômico, social e cultural dessa região (MARTINS, 2007).

A história mostra o tamanho da importância da atividade cacaeira baiana, tanto para o país como também para o mundo. Devido à sua grande produção de amêndoas, em que os preços cotados na bolsa de Nova York chegaram a quatro mil dólares no final da década de 1970. O cacau tornou-se uma *commoditie* bastante importante na economia nacional, e o Estado da Bahia supria boa parte da demanda mundial pelas sementes do cacau, dada a exportação de praticamente toda sua produção.

No Estado da Bahia, a cacauicultura passou por períodos difíceis, em 1929 por problemas internos enfrentados pelos Estados Unidos, e trinta anos depois, devido a uma nova queda brusca na cotação dos frutos, causada pela grande

produção internacional (principalmente a Africana); juntamente ao surgimento da doença vassoura de bruxa, isso acarretou em reduções bruscas na quantidade e qualidade dos frutos, sendo um dos motivos que levaram os produtores ao endividamento e abandono de suas propriedades.

Não obstante, o país aposta no retorno ao topo da lista dos principais produtores e exportadores, uma vez que a cacauicultura vem sendo explorada também em regiões com pouca ou nenhuma tradição em seu cultivo. Para tanto, a adoção de novas tecnologias como irrigação e/ou fertirrigação, aliada aos novos modelos de produção e também ao melhoramento genético, tem sido utilizada como estratégias na melhoria da produção brasileira.

3.3. O cacaueteiro e sua relação com o ambiente de cultivo

Por muitos anos, acreditava-se que um ambiente favorável para o bom desenvolvimento dos cacauais era aquele em que os solos fossem profundos e férteis, porém, o cultivo de cacau vem sendo realizado com sucesso nos Tabuleiros Costeiros de algumas regiões, em que os solos são rasos, com camadas de impedimento próximas ao sistema radicular efetivo da cultura, sendo a caracterização física e hídrica, necessária para viabilizar a sua produção.

Portanto, avaliar os atributos físicos e hídricos em solos de Tabuleiros Costeiros e principalmente sua variabilidade espacial auxiliará os produtores no manejo do solo e da água, visando principalmente a aplicação dos insumos na área, uma vez que esses solos têm como característica típica a presença de camadas coesas logo nos primeiros 30,0 cm, configurando em impedimento físico para o desenvolvimento das raízes e, conseqüentemente, a extração de água e nutrientes.

Tudo isso compromete a eficiência de qualquer estratégia a ser aplicada para melhorar a produtividade e qualidade dos frutos. Portanto, no planejamento agrícola deve-se considerar a variabilidade espacial e até mesmo temporal dos atributos do solo das áreas de plantio, visto sua influência negativa sobre a produtividade, por interferir na disponibilidade de nutrientes às plantas (SILVA; LIMA; QUEIROZ, 2011; VALENTE et al., 2012).

Para avaliar a qualidade física e hídrica dos solos, diversos pesquisadores têm avaliado a resistência do solo à penetração de raízes, densidade do solo, porosidade total, retenção de água no solo, distribuição do volume de poros,

sobretudo macroporos e condutividade hidráulica do solo saturado (ARAÚJO et al., 2012; STEFANOSKI et al., 2013; LISBÔA et al., 2016; SALES et al., 2016; SILVA et al., 2017; VOGEL et al., 2017).

Dessas variáveis, a condutividade hidráulica do solo saturado, vem sendo bastante estudada, visto que está relacionada com atributos importantes, que por sua vez, influem no fluxo de água no solo, como a densidade do solo, granulometria, macroporos e continuidade de poros (SCHOLL et al., 2014; NETO; OLIVIERA; PEREIRA, 2017; ZIEBA, 2017; ALAGNA et al., 2018).

Além disso, por ser a variável que mais influi no fluxo de água, visto que representa a facilidade com que a solução do solo é conduzida em seu perfil, caracterizá-la torna-se necessário no planejamento agrícola, uma vez que se trata de um atributo que apresenta dependência no espaço, e o conhecimento de sua variabilidade espacial auxiliará os produtores na tomada de decisão quanto ao manejo do solo, cultura, água e nutrientes, visando manter a produtividade da cultura crescente e a qualidade do solo.

Além do solo, o clima é outro fator importante para o desenvolvimento da cultura do cacau, e que devido ao bom desenvolvimento das plantas em regiões quente e úmido, com temperatura média de 25°C e precipitação anual acima dos 1.500 mm (CEPLAC, 2018a). Atualmente, ainda são citadas que essas sejam as condições ambientais ideais para uma produção satisfatória dos pomares; porém, se houver períodos de seca, que impeçam que a planta continue se desenvolvendo e, principalmente, para não prejudicar a floração, é necessário contar com técnicas de irrigação.

O seu uso na atividade cacaeira, principalmente nas regiões que não são tradicionais em seu cultivo, tem quebrado esse paradigma, incrementado entre 40,0% a 100,0% as produtividades em várias regiões, garantido assim, um ambiente que seja favorável à produtividade da cultura (HUAN; YEE; WOOD, 1984; SIQUEIRA; MULLER; PINHO, 1987; FREIRE, 1993; SIQUEIRA et al., 1996).

Partindo do pressuposto de que a temperatura e o regime pluviométrico se caracterizam como os fatores mais relevantes para o bom desenvolvimento do cacaeiro, é de suma importância a realização de estudos sobre o comportamento dessa cultura em ambientes com regimes pluviométricos distintos, assim como as demais condições meteorológicas.

As regiões tropicais por apresentarem características semelhantes à do habitat natural do cacau, visto a positividade de suas respostas fisiológicas e fenológicas às condições meteorológicas, estudos de demanda hídrica, principalmente para manejo da irrigação, por muito tempo não foram objetivos de pesquisas nessas regiões, uma vez que, o regime pluviométrico atendia as necessidades hídricas da cultura; além disso, com exceção da pluviosidade, temperatura, radiação solar e duração do fotoperíodo, apresentavam pouca ou nenhuma variação (ALVIM, 1987).

Portanto, é notável o quanto o cacauzeiro é dependente de condições ótimas de umidade no solo, sejam elas providas de precipitações pluviométricas ou práticas de irrigação, dada sua sensibilidade à deficiência hídrica, que, por sua vez, é considerada um impedimento mais relevante que os problemas fitossanitários (ALVIM, 1965; AMORIM; VALLE, 1992).

3.4. Estratégias para melhorar a produção e reduzir a incidência de pragas e doenças

As áreas de cultivos tradicionais têm enfrentado diversos problemas, destacando-se os fitossanitários e econômicos. Como o cultivo é realizado majoritariamente em regiões de clima tropical, são essas que mais tem enfrentado tais problemas, visto que o clima é favorável à proliferação com conseguinte disseminação de doenças como a vassoura de bruxa, causada pelo fungo *Moniliophthora perniciosa* (COPETTI et al., 2011). De acordo com Alexandre et al. (2015), trata-se de um patógeno que promove justamente o desenvolvimento excessivo dos tecidos meristemáticos levando a um crescimento hipertrófico, que confere à planta a aparência de vassoura.

Além disso, nas formas tradicionais de cultivo as plantas são mantidas em condições de sombreamento definitivo, cujos efeitos são muito complexos, envolvendo a redução da intensidade luminosa, temperatura, velocidade do vento e impactos na umidade relativa do ar e na umidade do solo (DIAS, 2001).

Estudos demonstram que os cacauais tem sua produção aumentada em função do aumento da luminosidade na área de plantio (ZUIDEMA et al., 2005) e que cultivos de plantas individuais, ou seja, sem consórcio, mais conhecidos

como a pleno sol, também tendem a reduzir e/ou eliminar a incidência de doenças como a vassoura de bruxa.

Com o avanço das tecnologias de produção agrícola obtidas nos últimos anos, há possibilidades de implantação com sucesso da cultura em áreas consideradas não tradicionais, devido principalmente às novas técnicas de irrigação, fertirrigação, manejo e do material genético melhorado. Além disso, essas áreas servem como escapes ao ataque da doença vassoura de bruxa, enfrentado nas regiões de clima tropical, consideradas tradicionais no cultivo do cacau.

Os clones, por apresentarem maior resistência aos problemas fitossanitários e serem mais produtivos, tornam o seu cultivo uma realidade, que, por sua vez, é vista em várias regiões, configurando-se como a principal estratégia dentre as demais, para solucionar os problemas que há anos vem assustando os produtores de cacau. Portanto, os produtores contam com um número bem expressivo de clones com as características descritas, dentre os quais o clone CCN 51 (CEPLAC, 2018b), que é um dos mais utilizados no Estado da Bahia.

A implantação de áreas cultivadas com cacau a pleno sol também pode ser vista como uma estratégia que se soma às demais no aumento da produção no país. Sendo assim, a forma com que a cultura vem sendo cultivada, aliada ao uso de sistemas de irrigação para melhor controle da umidade do solo, conjuntamente ao uso de variedades mais resistentes e produtivas, configuram em estratégias para recuperar a produtividade das lavouras. Uma vez atendidas as exigências da planta, pelo suprimento de água e nutrientes, via sistemas de irrigação e controle fitossanitário, a cultura terá um ambiente, sombreado ou não, favorável para se desenvolver e alcançar produtividade satisfatória (NANETTI; SOUZA; FANQUIN, 2000).

Dentre os métodos de irrigação, o localizado, via sistema de microaspersão e gotejamento, é o que melhor se adequa ao cultivo do cacau, por atender a maioria dos objetivos e que, portanto, vem sendo incrementado em várias regiões, enfraquecendo paradigmas a respeito do cultivo em florestas, permitindo assim que o agricultor venha a expandir a produção por meio de cultivos a pleno sol. Essa é uma realidade que já vem sendo observada diante da introdução de tais tecnologias (NETAFIM, 2008).

A produção da lavoura com técnicas de irrigação foram observadas por alguns autores na literatura, que citam sua importância no aumento da produtividade das lavouras. Siqueira (2018a), por exemplo, mostra a diferença em ganhos de produção entre os pomares de cacau irrigados e não irrigados, ambos com o mesmo espaçamento de três metros entre fileiras de plantas e uma densidade de 1.100 plantas por hectare, cuja diferença na produção da lavoura irrigada (100,0 arrobas ha⁻¹) supera a não irrigada (40,0 arrobas ha⁻¹) em 60,0% a mais e, juntamente com a adubação (fertirrigação), os produtores podem dobrar a produção passando de 100,0 para 200,0 arrobas ha⁻¹. Ainda de acordo com o autor, a irrigação traz para os produtores não só uma maior produtividade, como também um aumento no peso das sementes, que pode ultrapassar 70,0%, passando de 0,80 g para até 1,40 g.

Siqueira et al. (2018b) relatam o aumento significativo na produção de cacauzeiros irrigados em duas regiões: norte do Espírito Santo, em que o aumento chegou a 54,0%, e no Recôncavo Baiano aos 100,0%.

Dada a importância da irrigação no cultivo do cacau, regiões não tradicionais vêm adotando com sucesso essas técnicas. É o caso da região semiárida que, segundo a CODEVASF (2009), ao utilizarem tecnologias como sistemas de irrigação por gotejamento na irrigação/fertirrigação, a produção supera a das regiões tradicionais, onde no Vale do São Francisco, por exemplo, alcança 4,5 t de cacau (300 arrobas ha⁻¹), o que não tem sido observado em regiões tradicionais, cuja produção está abaixo de 0,75 t (50 arrobas ha⁻¹).

Portanto, o que se tem observado é que tecnologias de irrigação aplicadas à cultura, aliadas aos modelos de produção e ao melhoramento genético, evidenciam altas produtividades, como mostram os resultados obtidos por pesquisadores da CEPLAC, ficando claro que a cacauicultura irrigada configura-se em uma atividade altamente lucrativa (BEGIATO et al., 2009).

3.5. Demanda de água pela cultura do cacau

O cacauzeiro, por ser um vegetal historicamente cultivado em condições ótimas de umidade no solo, devido ao regime de chuvas nas regiões em que é conduzido são escassas as informações sobre seu consumo hídrico,

principalmente nas condições em que é cultivado, sombreado ou não. Entretanto, essas informações são de suma importância para o manejo da irrigação.

Leite (2013) determinou o consumo hídrico de cacau jovem irrigado e cultivado em consórcio com bananeira e pau-brasil, em um experimento conduzido no Centro de Pesquisa do Cacau (CEPEC), da Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC), em Ilhéus, Bahia. Ele obteve uma evapotranspiração média da cultura de 3,5 mm por dia, em que o consumo médio de água diário da cultura, considerando um espaçamento de 3,0 m x 3,0 m, com uma densidade de 1.111 plantas ha⁻¹, para as condições agroclimatológicas locais, foi de 31,5 L pl⁻¹ d⁻¹.

Outros trabalhos publicados na literatura, tão relevantes como o de Leite (2013) foram realizados para entender os mecanismos de tolerância dos mais variados materiais genéticos submetidos a ambientes com deficiência hídrica e assim poder verificar quais alterações fisiológicas, moleculares e bioquímicas ocorrem caso a espécie seja cultivada em condições deficitárias de umidade no solo (JOLY; HAHN, 1989; DENG; JOLY; HAHN, 1990; RAZI et al., 1992; GAMA-RODRIGUEZ; VALLE; ROSSIELLO, 1995; SANTOS et al., 2014).

Na literatura também se observa que trabalhos vêm sendo realizados com a finalidade de avaliar as relações das variáveis associadas às trocas gasosas com o potencial hídrico foliar (Ψ_w) que, por sua vez, está relacionado às condições de umidade do solo, visto que o mesmo é diretamente influenciado por tais condições (CRUZ et al., 2007).

Nesses tipos de pesquisas, o interessante é poder quantificar a extensão do estresse (moderado ou severo) pela planta, quando o Ψ_w é reduzido em consequência da duração e intensidade do déficit hídrico (DENG; JOLY; HAHN, 1990). Uma vez que sua intensidade varia a depender do estado fenológico da cultura e do genótipo (SHAO et al., 2008; ARAQUE et al., 2012; SANTOS et al., 2014), isso permite maior segurança na hora de escolher variedades que sejam tolerantes a ambientes de cultivos atípicos aos considerados tradicionais.

Lama Isminio (2016) relatou que, a partir das relações das trocas gasosas com o Ψ_w , é possível indicar quais sejam os valores dos potenciais que mais refletem no fechamento dos estômatos, para que as perdas de água por transpiração das plantas sejam minimizadas. O autor ainda reforça a importância dos estudos envolvendo tais relações, quando menciona que a produção de

biomassa é gravemente afetada pela associação dos valores de Ψ_w com a redução drástica da taxa de assimilação de CO_2 e, com isso, mostra que tais informações são relevantes em cultivos irrigados de cacau, evitando que o manejo da água seja realizado de forma equivocada para cada genótipo cultivado.

Recentemente, Fraga Junior (2017) realizou um estudo a respeito das relações hídricas do cacau, relacionando o consumo hídrico da cultura com sua área foliar, a demanda hídrica atmosférica e o potencial de água no solo em condições de sombreamento e a pleno sol. Ele deixou explícita a importância de mais estudos para a cultura em seu ambiente de cultivo, quando concluiu que as condições em que a cultura foi conduzida influenciaram significativamente na sua transpiração e no seu crescimento vegetativo, ocasionados por reduções na radiação solar de 22,0% e 32,0% nas condições em que as plantas foram impostas.

Diante do exposto, observa-se que, na busca por dados a respeito da necessidade hídrica da cultura do cacau, poucas são as informações disponíveis nos trabalhos científicos, vindo a ser justificado pela sua maior exploração que, por muito tempo, ocorria em regiões com índices pluviométricos elevados.

Mesmo assim, não se pode deixar de mencionar a importância de mais trabalhos sobre a necessidade hídrica dessas plantas, com a finalidade de se planejar melhor o suprimento hídrico da mesma, evitando assim o estresse da cultura, tanto por déficit como por excesso de água, e com isso evita-se também que a produção de cacau no país pare de crescer, tendo em vista que as estimativas da Associação Nacional das Indústrias de Cacau (AIPC), para os próximos 10 anos, é que o Brasil saia da quinta para a terceira posição no ranking dos maiores produtores de amêndoas de cacau do mundo.

Para tanto, os impactos provocados pelo déficit hídrico, que além de atingirem a cultura também afetam a quem sobrevive dela, trazendo resultados negativos para a economia, devem ser evitados, para que não se repita o que ocorreu recentemente no Brasil, onde houve reduções de praticamente 30,0% da produção na safra 2015/2016 e de 40,0% na de 2016/2017, no principal estado produtor de cacau do país, decorrente da estiagem que se prolongou por mais de quatro meses (PORTUGAL, 2016), fazendo com que a Bahia perdesse a primeira colocação para o Pará, na lista dos maiores produtores de amêndoas de cacau do país.

3.6. Evapotranspiração de culturas agrícolas e os fatores que a afetam

Uma das formas de quantificar a demanda de água por uma cultura é por meio da determinação de sua evapotranspiração, processo biofísico que envolve simultaneamente, a evaporação da água de uma superfície vegetada e a transpiração desta, em que as medidas de ambos quando separadas são muito complexas (PEREIRA; SEDYAMA; VILLA NOVA, 2013; AFANDI; ABDREBBO, 2015).

Na agricultura, o termo evapotranspiração foi empregado primeiramente em 1944 por Thornthwaite e Wilm que, em seguida, no ano 1948, passaram a contribuir cientificamente para os estudos hidrológicos e climatológicos, em que o objetivo era uma classificação climática proposta por Thornthwaite (1948), e também o desenvolvimento de um balanço hídrico climatológico, surgindo a partir de então o conceito de evapotranspiração potencial - ETP, tido como um elemento climático oposto à chuva (PEREIRA; SEDYAMA; VILLA NOVA, 2013), sendo diferenciada da evapotranspiração de referência - ETo, por corresponder lâminas de água que percorrem o sistema solo-planta, sendo posteriormente perdidas para a atmosfera, em condições padronizadas.

Já o conceito de ETo popularizado por Doorenbos; Pruitt (1977), utilizado pela primeira vez por Jensen; Wright; Pratt (1971), com o propósito de que seu valor fosse utilizado como referência na estimativa da ETc surgiu a partir do método original de Penman, que ficou conhecido por Penman-Monteith, logo após sua proposição por Monteith na década de 1960, em que o objetivo era justamente a estimativa direta da ETc e que, após a parametrização da FAO (*Food and Agriculture Organization*), passou a ser denominado de método de Penman-Monteith FAO (PM-FAO) (PEREIRA; SEDYAMA; VILLA NOVA, 2013).

Essa revolução nos conceitos e métodos, que tornou o de Penman-Monteith padrão FAO o indicado para a estimativa da evapotranspiração, serviu também para definir que a cultura de referência (hipotética) tivesse seus valores numéricos utilizados como parâmetro padrão na realização dos cálculos da ETo, por sua semelhança com a evapotranspiração da grama e que, segundo Allen et al. (1998), ficou determinado que se assumissem respectivamente para altura, albedo e resistência da cultura ao transporte de vapor d'água, valores correspondentes a 0,12 m; 0,23 e 70 s m⁻¹, e portanto a ETo ficou conceituada

por esses autores, como sendo a ET de uma cultura hipotética em uma determinada superfície.

Para esses pesquisadores em concordância com Thornthwaite (1948), a ETo constitui-se em um elemento climático que expressa o poder evaporante da atmosfera, ou seja, que expressa para cada local e período, a demanda das culturas agrícolas por água e, sendo assim, a ETo é tida como igual a ETP (PEREIRA; SEDYAMA; VILLA NOVA, 2013).

A partir do surgimento do termo evapotranspiração, outros termos foram propostos e conceituados diferindo do original, como os de evapotranspiração real (ETr) que, segundo Pereira; Sedyama; Villa Nova (2013), também foi introduzido no cálculo do balanço hídrico climatológico por Thornthwaite que a diferenciou da ETP por ocorrer em condições de restrição hídrica, ou seja, em períodos sem ocorrência tanto de eventos de precipitações como de irrigações.

Já o surgimento do termo evapotranspiração da cultura (ETc) que, na definição de Doorenbos; Pruitt (1977), trata-se da lâmina de água consumida por uma cultura qualquer durante seu ciclo fenológico, e para tanto, é um indicativo da quantidade de água que deve ser repostada ao solo equivalendo a evapotranspirada, sendo também tida como um parâmetro para planejamento da agricultura irrigada (PEREIRA; SEDYAMA; VILLA NOVA, 2013).

Visto as dificuldades práticas em medir diretamente a ET das culturas, a mesma tem sido estimada por meio do produto da ETo com um coeficiente de ajuste (K_c), cujos valores são originados de sua relação com medidas diretas de evapotranspiração por métodos lisimétricos, tornando-se uma referência clássica após Doorenbos; Pruitt (1977) tabelarem os resultados experimentais obtidos para várias culturas e em climas distintos (PEREIRA; SEDYAMA; VILLA NOVA, 2013).

Segundo Pereira; Sedyama; Villa Nova (2013), a evapotranspiração poderá ser afetada pelo manejo dos cultivos, tendo seu conteúdo minimizado caso algumas práticas que facilitem reduções na evaporação do solo sejam adotadas, tais como o emprego do sistema de irrigação localizada e a forma de plantio direto. Além desse, Lemos Filho et al. (2010) citam também os climáticos, da planta e do próprio manejo do solo. Dos elementos meteorológicos têm-se: precipitação, velocidade do vento, razão de insolação, umidade relativa e temperatura máxima e mínima.

A temperatura do ar é um fator de grande importância, pois aumenta devido à radiação solar, que é absorvida pela atmosfera, sendo o calor emitido pela terra (PEREIRA; SEDYAMA; VILLA NOVA, 2013). Partindo dessa premissa, este fator tem interferência nas condições ambientais e interação com outras variáveis de importância para o processo de evapotranspiração (MEDEIROS, 2003).

Conforme Klar (1988), a umidade do ar é dependente da temperatura. Quando a temperatura diminui na mesma umidade absoluta do ar, ocasionará aumento da umidade relativa e, conseqüentemente, queda na evaporação. Dessa forma, quanto maior for a umidade relativa menor será a demanda evaporativa; isso significa dizer que menor será a evapotranspiração (PEREIRA; SEDYAMA; VILLA NOVA, 2013). Já em relação as características das plantas, pode-se citar o coeficiente de reflexão (albedo), espécie, altura da planta, profundidade do sistema radicular e estágio de desenvolvimento (PEREIRA; SEDYAMA; VILLA NOVA, 2013).

3.7. Métodos de determinação da evapotranspiração

Em áreas irrigadas, a estimativa da evapotranspiração é uma medida da demanda de água de uma cultura, cujos valores são utilizados no planejamento de uso da água de irrigação (ALLEN et al., 2011; FOOLADMAND, 2012; NIAGHI et al., 2013; TABARI; GRISMER; TRAJKOVIC, 2013).

Conforme Grismer et al. (2002), aproximadamente cinquenta métodos indiretos são utilizados para realização de estimativas da ET, sendo necessárias, informações meteorológicas distintas o que leva a resultados inconsistentes, além desses, os diretos como a lisimetria e balanço hídrico de campo, também são utilizados e citados como os mais precisos (SANTOS et al., 2017).

A utilização de um ou outro método depende de alguns fatores, tais como a disponibilidade de dados meteorológicos e a escala de tempo requerida. Dessa forma, dentre os métodos de estimativa da ETo, os empíricos possuem aplicabilidade praticamente universal, resultando em correlações entre os elementos meteorológicos medidos por meio de condições padrão. Existem combinações dos métodos com os efeitos do balanço de energia e com aqueles do poder evaporante do ar (PEREIRA; SEDYAMA; VILLA NOVA, 2013).

Os métodos diretos são os lisimétricos e o balanço de água no solo; o destaque é dado aos lisimétricos por serem os mais indicados para medidas em intervalos de tempo menor. No caso dos métodos indiretos, destaca-se o modelo de Penman-Monteith, recomendado pela FAO no boletim de Irrigação e Drenagem nº 56 (FAO-56), como padrão para determinação da evapotranspiração de referência (ALLEN et al., 1998).

3.7.1. Penman-Monteith

A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), em busca da padronização para estimativas da ETo, recomendou a equação de Penman-Monteith (PM-FAO 56) como padrão (Equação 01). Esse método é mais completo que os demais por envolver variáveis condicionantes ao processo de evapotranspiração, tais como: temperatura, umidade, vento, radiação ou duração de brilho solar, e que, portanto, as medidas por eles, indicam resultados com estimativas mais seguras quando comparadas a outros métodos que, por exemplo, envolvem apenas a temperatura (ALLEN et al., 1998).

Tendo em vista a parametrização da equação de Penman-Monteith da FAO-56, alguns métodos empíricos são analisados tomando esse, como referência (PEREIRA; SEDYAMA; VILLA NOVA, 2013), cujos cálculos são realizados com base na equação 01:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \left(\gamma \frac{900}{T+273}\right) U_2(e_s - e_a)}{\Delta + [\gamma(1 + 0,34U_2)]} \quad (01)$$

em que, ETo é a evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); Δ é a declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água (kPa °C⁻¹); Rn é o saldo de radiação (MJ m⁻² dia⁻¹); G é a densidade do fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹); γ é o coeficiente psicrométrico (kPa °C⁻¹); T é a temperatura média do ar (°C); U₂ é a velocidade do vento a 02 m de altura (m s⁻¹); e é a pressão de saturação do vapor d'água do ar (kPa); e e_a é a pressão de vapor atual d'água do ar (kPa).

3.7.2. Lisimetria de pesagem

Para as determinações diretas da ETc, os lisímetros têm sido citados na literatura como os instrumentos mais adequados quando se busca por medidas confiáveis. Eles são definidos como lisímetros ou evapotranspirômetros, em que inicialmente eram utilizados para estudos sobre a drenagem profunda e a concentração de nutrientes extraídos do volume de solo. Atualmente, esses equipamentos passaram a ser usados na determinação da evapotranspiração, sendo de grande utilização também em estudos agrometeorológicos (PEREIRA; SEDYAMA; VILLA NOVA, 2013).

A lisimetria, conforme Aboukhaled; Alfaro; Smith (1986) proporciona o cálculo da medida volumétrica de entradas e saídas de água do sistema, que pode ou não ser coberto pelo vegetal. Em estudos agrometeorológicos, os lisímetros utilizados são os de pesagem, drenagem e de lençol freático constante.

A lisimetria de pesagem é um método considerado padrão para medidas de ETc. Esses dispositivos são cheios de solo, sendo localizados no campo com a finalidade de representar um ambiente específico, podendo apresentar uma superfície nua ou coberta por uma vegetação, determinando diretamente o consumo hídrico da cultura (ABOUKHALED; ALFARO; SMITH, 1986).

Os lisímetros de pesagem diferem dos de drenagem e de lençol freático constante por determinar a evapotranspiração apelo balanço de massa, sendo que nos demais, ao invés da massa, são registrados conteúdos volumétricos. Para tanto, a lisimetria de pesagem apresenta uma boa representatividade das medidas (PRUITT; ANGUS, 1960).

Howell; Schneider; Jensen (1991) afirmaram que esses equipamentos são os mais precisos quando calculam a ETc em períodos menores que um dia; quando as medidas da ETo são precisas, a metodologia pode ser utilizada como padrão na calibração de equações que estimam seus valores (CARVALHO et al., 2013).

Porém, são métodos que, como os demais, também apresentam limitações, em que as principais estão relacionadas aos custos elevados na obtenção de seus sensores, manutenção do sistema e aquisição de dados, tornando estes de uso específico para fins de pesquisas.

O lisímetro provoca uma perturbação maior no movimento horizontal do ar, aumenta o grau de turbulência do calor sensível do ar sobre a cultura e aumenta a transpiração da vegetação, devido às diferenças em crescimento das culturas no interior dos lisímetros em relação à área externa, especialmente quando as plantas crescem mais no interior. A interceptação da radiação solar pelas folhas incidentes também aumenta numa proporção que pode chegar a 40,0% (SEDIYAMA, 1996).

Os efeitos térmicos do solo podem ser minimizados pelo seu desenho. As paredes de separação entre a parte externa e interna devem ser o menos espessas possível; além disso, essas paredes devem ter o mínimo de elevação. Gangopadhyaya et al. (1966) estabeleceram os principais cuidados na instalação de lisímetros: a) o lisímetro deve ser suficientemente grande para assegurar a sua representatividade quanto à cobertura vegetal e ao efeito de sua presença; b) as condições físicas no interior do equipamento devem ser as mesmas da área circundada; e c) devem ser instalados em locais onde o efeito da advecção seja minimizado. Na literatura, alguns trabalhos descrevem o processo de construção e operação desses equipamentos.

Bergamaschi et al. (1997), por exemplo, se enquadram na lista dos pesquisadores que descreveram as características e operação de um lisímetro de pesagem, em que as dimensões eram de 3,4 m de comprimento, 1,5 m de largura e 0,8 m de profundidade. Neste tipo de sistema, o “peso” morto é contrabalanceado mecanicamente por um conjunto de alavancas e contrapesos, enquanto as variações do “peso” vivo são registradas por um dinamômetro de pequena capacidade.

Já em Silva (1996) estão descritos os processos de construção, instalação e operação de um lisímetro de pesagem para a determinação da ETo, em que a lâmina evapotranspirada era calculada em função das entradas e saídas de massa do sistema baseado em célula de carga; pode-se verificar que as mensurações diárias apresentaram boa concordância com os valores diários estimados pelo método de Penman-Monteith. Além desses pesquisadores, muitos outros desenvolveram e vem desenvolvendo seus estudos a respeito da demanda hídrica das culturas, utilizando a lisimetria de pesagem (ALLEN et al., 2011; CAMPECHE et al., 2011; CARVALHO et al., 2013; SANTOS et al., 2017;).

3.7.3. Balanço hídrico de campo

Além da lisimetria, o balanço de água no solo também é um método bastante utilizado para quantificar o consumo hídrico da cultura do cacau que, por sua vez, permite um estudo mais acurado da dinâmica de água no solo que esteja cultivado pelas plantas.

Para o método do balanço de água no solo, as medidas de umidade no solo são de extrema importância, em que pesquisadores como Thornthwaite; Mather (1955) já deixavam clara a importância de tais medidas, uma vez que a disponibilidade de água no solo depende de seu armazenamento, tornando este um componente de grande importância para os cálculos da lâmina de água requerida pela cultura. Para a execução de tais medidas, os estudiosos na área também vêm optando por técnicas que envolvem aparatos tecnológicos como a Técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), amplamente utilizada nos experimentos e que se sobressaem em relação às demais técnicas, devido suas inúmeras vantagens.

Portanto, o balanço de água no solo constitui-se em um método que permite estimar a evapotranspiração da cultura, fazendo uso de instrumentos que possibilitam conhecer os processos do balanço de água no solo, como as entradas e saídas de água em um determinado volume controle de solo, assim como o saldo do balanço, que é a água armazenada no volume explorado pela cultura. Os componentes do balanço compõem a equação que contabilizam as entradas e saídas, entre o tempo final e inicial, ou seja, entre irrigações. De acordo com Libardi (2005), o saldo desse balanço corresponde à variação de armazenagem de água para o período considerado.

Entre as formas de entrada de água no solo, a chuva é a principal, nas áreas tradicionais de cultivo de plantas de cacau; porém, com os novos modelos de produção, a irrigação também constitui em uma forma de entrada. A água de precipitação é medida com o auxílio de pluviômetro de forma manual ou por meio de um sistema de aquisição de dados (CRUZ, 2005). Já a água no solo drenada abaixo do volume explorado é determinada com a quantificação da densidade de fluxo por meio da equação de Darcy-Buckingham (LIBARDI, 2005).

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUKHALED, A.; ALFARO, Y. M.; SMITH, M. **Los lisímetros**. Roma: FAO, 1986. 59 p. (FAO, Paper 39).

AFANDI, G. E.; ABDRABBO, M. Evaluation of reference evapotranspiration equation under current climate conditions of Egypt. **Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology**, v. 3, n. 10, p. 819-825, 2015.

ALAGNA, V. et al. The impact of the age of vines on soil hydraulic conductivity in vineyards in eastern Spain. **Water**, v. 10, n. 14, p. 2-11, 2018.

ALEXANDRE, R. S. et al. Caracterização de frutos de clones de cacauzeiros na região litorânea de São Mateus, ES. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 8, p. 785–790, 2015.

ALLEN, R. G. et al. Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, n. 6, p. 921-929, 2011.

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage, Paper 56).

ALMEIDA, C. M. V. C.; DIAS, L. A. S.; SILVA, A. P. Caracterização agrônômica de acessos de cacau. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 368-373, 2009.

ALMEIDA, A. A. F.; VALLE, R. R. Ecophysiology of the cacao tree. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 19, n. 4, p. 425-448, 2007.

ÁLVAREZ, C.; PEREZ, E.; LARES, M. Morfología de los frutos y características físico-químicas del mucílago del cacao de tres zonas del Estado Aragua. **Agronomía Tropical**, v. 52, p. 497-506, 2002.

ALVIM, P. T. **Relações entre fatores climáticos e produção do cacauzeiro**. In: INTERNATIONAL COCOA RESEARCH CONFERENCE, 10, 1987, Santo Domingo, Rep. Dominicana. Proceedings... Santo Domingo: p. 159-167, 1987.

ALVIM, P. T. As necessidades de água do cacauzeiro. **Revista Cacau Atualidades**. Itabuna, Bahia, Brasil, v. 2, n. 3, p. 29-38, 1965.

AMORIM, S. M. C.; VALLE, R. R. Efeito da temperatura radicular na resistência ao movimento de água no cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.). **Acta Botanica Brasilica**, 6: 55–64, 1992.

ARAQUE, O. et al. Comparative photosynthesis, water relations, growth and survival rates in juvenile criollo cacao cultivars (*Theobroma cacao* L.) during dry and wet seasons. **Experimental Agriculture**, v. 48, p. 513–522, 2012.

ARAÚJO, E. A. et al. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, Cascavel, v. 5, n. 1, p. 187-196, 2012.

BARTLEY, B. G. D. **The genetic diversity of Cacao and its utilization**. Massachusetts: CABI Publishing, 2005. 341p.

BEGIATO, G. F. et al. Análise do sistema agroindustrial e Atratividade dos Vales do São Francisco para a cacauicultura irrigada. **Custos e agronegócio**, v. 5, n. 3, p. 55-87. 2009.

BERGAMASCHI, H. et al. Automação de um lisímetro de pesagem através de estação meteorológica, a campo. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 10, 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBA, p. 222-224. 1997.

CAMPECHE, L. F. M. S. et al. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte I: Desenvolvimento e calibração. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 5, p. 519-525, 2011.

CARR, M.; LOCKWOOD, G. The water relations and irrigation requirements of cocoa (*Theobroma cacao* L.): A REVIEW. **Experimental Agriculture**, v. 47, n. 4, p. 653-676, 2011.

CARVALHO, H. P. et al. Desenvolvimento de lisímetros de pesagem na cultura do café. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 6, p. 1750-1760, 2013.

CEPLAC. 2018a. Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira. **Cacau: história e evolução**. Disponível em:<<http://www.ceplac.gov.br/radar/cacau.htm>>. Acesso em: 21 jan. 2018.

CEPLAC. 2018b. Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira. **Lista de clones**. Disponível em: <<http://www.ceplac.gov.br/radar/ListaClones.asp>>. Acesso em: 21 de janeiro 2018.

COCOA WORLD FOUNDATION, **Cocoa value chain**. 2018. Disponível em: <https://www.worldcocoafoundation.org/about-cocoa/cocoa-value-chain/>>. Acesso: 26 Des, 2019.

CODEVASF Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco. **Cadeia produtiva de cacau: oportunidade de investimento em cacauicultura no Vale do São Francisco e do Parnaíba**. Brasília, 2009. 33 p.

COPETTI, M. V. et al. Aflatoxigenic fungi and aflatoxin in cocoa. **International Journal of Food Microbiology**, 148: 141-144, 2011.

CRUZ, M. C. M. et al. Avaliação do potencial hídrico foliar, umidade do solo e temperatura do ar no período pré-florescimento dos citros. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 5, p. 1291-1296, 2007.

CRUZ, F. A. **Instalação e calibração de lisímetro de pesagem e determinação da evapotranspiração de referência para a região de Seropédica** - RJ. 2005. 79 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2005.

DENG, X.; JOLY, R. J.; HAHN, D. T. The influence of plant water deficit on photosynthesis and translocation of ¹⁴C-labelled assimilates in cacao seedlings. **Annals of botany**, 78: 623–627, 1990.

DIAS, L. A. S. Origem e dispersão de *Theobroma cacao* L: novo cenário. In: DIAS DIAS, L. A. S; RESENDE, M. D. V. Estratégias e métodos de seleção. In: DIAS L. A. S. (Ed.) **Melhoramento genético do cacaueiro**. Viçosa, MG: FUNAPE/UFG, 2001. p. 81-127.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: Estudio FAO, 1977. 179 p. (Irrigation and Drainage, Paper, 24).

EUROMONITOR. **Global trends and developments in cocoa ingredients (world)**. Euromonitor International, set. 2016.

FEDECACAO – FEDERACIÓN NACIONAL DE CACAOTEROS DE COLOMBIA. (2015). **Guía técnica para el cultivo del cacao**. 6. ed. Bogotá, Colombia. 180 p.

FLUMIGNAN, D. L. **Lisímetros de pesagem direta para o estudo do consumo hídrico do pinhão manso (*Jatropha curcas* L.)**. 2011. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

FRAGA JUNIOR, L. S. **Relações hídricas do cacauzeiro: efeito da área foliar, potencial da água do solo e condições de sombreamento** -BA. 2017. 61 f. Dissertação (Mestrado em engenharia agrícola) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Cruz das Almas Bahia, 2017.

FRANCK, A. G. S. et al. Análise da competitividade do mercado exportador brasileiro de cacau para Argentina e Estados Unidos. **Revista de Administração-FW**, v. 14, n. 25, p. 42-56, 2017.

FREIRE, M. de S. L. **Efeitos da irrigação complementar no rendimento do cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.)** 1993. 127 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, 1993.

FOOLADMAND, H. R. Comparing reference evapotranspiration using actual and estimated sunshine hours in south of Iran. **African Journal of Agricultural Research**, v. 7, n. 7, p.1164-1169, 2012.

FONSÊCA, M. H. P. et al. Uso de propriedades físico-hídricas do solo na identificação de camadas adensadas nos Tabuleiros Costeiros, Sergipe. **Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB**, v. 11, n. 4, p. 368-373, 2007.

GAMA-RODRIGUES, A. C.; VALLE, R. R.; ROSSIELLO, R. O. P. Crescimento, trocas gasosas e relações hídricas de plântulas de cacau em função de diferentes fontes de potássio. **Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 19, n. 3, p. 387-393, 1995.

GANGOPADHYAYA, M. et al. **Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration**. Genebra: WMO, 1966. 121p. Technical Note, 83, WMO, 201, TP 105.

GRISMER, M. E. et al. Pan evaporation to reference evapotranspiration conversion methods. **Journal of Irrigation Drainage Engineering**, New York, v. 128, n. 3, p. 180 - 184, 2002.

GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Ciências do Solo**, 37: 1174-1184, 2013.

HOWELL, A. T.; SCHNEIDER, D. A.; JENSEN, E. M. **History of lysimeter design and use of evapotranspiration measurements**. ALLEN, R. G. et al. (Ed.) *Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements*. New York: American Society of Civil Engineers, 1991, p. 1-9.

HUAN, L. K.; YEE, H. C.; WOOD, I. Irrigation of cocoa on Coastal Soils in Peninsular Malaysia. **International Conference on Cocoa and Coconuts**. 1984. 1: 117–132.

IBGE 2019. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola; 2019. (Accessed 28 Des 2019) Available: <https://www.sidra.ibge.gov.br/>

ICCO. International Cocoa Organization. Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics. **Cocoa year 2014/2015**. London: ICCO, v. 41, n. 1, p. 10, 2015.

ICCO. International Cocoa Organization. **The world cocoa market: current situation and forecast**. Berlim (GER): ICCO, mar. 2018. 13 p.

JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; PRATT, B. J. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. **Trans. ASAE**, 14: 954 959, 1971.

JOLY, R. J.; HAHN, D. T. Net CO₂ assimilation of cacao seedling during periods of plant water deficit. **Photosynth Res** (1989) 21: 151. <https://doi.org/10.1007/BF00037179>.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. 2. ed. São Paulo: Nobel, 1988. 408p.

LAMA ISMINIO, P. **Potencial hídrico foliar, trocas gasosas e crescimento em genótipos de *Theobroma cacao* L. submetidos à deficiência hídrica e adubação potássica**. 2016. 76 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

LEITE, L. R. C. (Org.). **Cacau e chocolate no Brasil: desafios na produção e comércio global**. Brasília: Ministério da Indústria Comércio Exterior e Serviços - MDIC e Unesco, 2018. 128 p.

LEITE, M. S. B. **Consumo hídrico do cacau jovem irrigado por gotejamento em consórcio com bananeira e pau-brasil - BA**. 2013. 68 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus Bahia, 2013.

LEMO FILHO, L. C. A. et al. Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Minas Gerais. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 12, p. 1294-1303, 2010.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335p.

LISBÔA, F. M. et al. Indicadores de qualidade de Latossolo relacionados à degradação de pastagens. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1184-1193, 2016.

LUCHIARI JUNIOR, A. et al. Zonas de Manejo: teoria e prática. In: INAMASU, R. Y. et al. **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, pp. 60-64. 2011.

MAPA 2019. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento: Pacote tecnológico da Ceplac contribui para aumento da produção de cacau 2019 (Accessed 29 de Des 2019) Available: <http://www.agricultura.gov.br/>.

MARTINS, R. **Processamento de chocolate**. Rio de Janeiro, 2007. 33f. Dossiê Técnico – Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro, REDETEC, 2007.

MEDEIROS, A. T. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE. **Engenharia Agrícola**, v. 23, n. 1, p. 31-40, 2003.

MELO, G. R. P.; CHITARRA, A. B. Características qualitativas de importância na gordura da amêndoa em nove híbridos de cacauero (*Theobroma cacao* L.) **Ciência e Agrotecnologia**, 23: 161-169, 1999.

MENEZES, S.; CARMO-NETO, D. A. **Modernização da agribusiness do cacau**. Salvador: CARGILL, 1993, p. 180.

MODA, L. R.; BOTEON, M.; RIBEIRO, R. G. Cenário econômico do mercado de cacau e chocolate: oportunidades para a cacauicultura brasileira. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 5, n. 10, p. 21203-21225, 2019.

MONTEIRO, W. R.; LOPES, U. V.; CLEMENT, D. **Genetic Improvement in Cocoa**. In: Jain SM, Priyadarshan PM (Ed.), *Breeding Plantation Tree Crops: Tropical Species*, Springer Science+Business Media, LLC, 2009.

NANETTI, D. C.; SOUZA, R. J.; FAQUIN, V. Efeito da aplicação de nitrogênio e potássio, via fertirrigação, na cultura do pimentão. **Revista Brasileira de Olericultura**, 13: 843- 845, 2000.

NASCIMENTO, A. H. C. et al. Desempenho de um lisímetro de pesagem hidráulica com diferentes sistemas de leitura. **Irriga, Botucatu**, v. 13, n. 5, p. 232-245, 2016.

NASCIMENTO, E. F. et al. Construção e calibração de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração e coeficiente de cultivo em videira de vinho cv. Syrah. **Irriga, Botucatu**, v. 16, n. 3, p. 271-287, julho-setembro, 2011.

NETO, G. K.; OLIVIERA, A.H.; PEREIRA, S. Y. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em uma sub-bacia às margens do rio Mogi Guaçu (SP). **Geociências**, São Paulo, v. 36, n. 2, p. 381- 394, 2017.

NETAFIM. **Cacau. of Plant Physiology**, 19: 425–448, 2008.

NIAGHI, A. R. et al. Evaluate several potential evapotranspiration methods for regional use in Tabriz, Iran. **Journal of Applied Environmental and Biological Sciences**, v. 3, n. 6, p. 31-41, 2013.

PEREIRA, A. R.; SEDYMA, G. C.; VILLA NOVA, N. A. **Evapotranspiração**. Campinas: FUNDAG, 2013. 323p.

PIRES, J. L. **Avaliação quantitativa e molecular de germoplasma para o melhoramento do cacauero com ênfase na produtividade, qualidade de frutos e resistência a doenças**. 2003. 226p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

PORTUGAL, E. **Estiagem reduz em até 40% produção de cacau no sul da Bahia**. 2016. Disponível em: <http://diariobahia.com.br/diario-de-noticias/9825-estiagem-reduz-em-ate-40-producao-de-cacau-no-sul-da-bahia>> Acesso em: 21 de jan. 2018.

PRUITT, W. O.; ANGUS, D. E. Large weighing lysimeters for measuring evapotranspiration. *Trans. Am. Soc. Agr. Engrs*, 3: 13-18, 1960.

RAZI, M. I. et al. Growth, plant water relation and photosynthesis rate of young *Theobroma cacao* as influenced by water stress. **Pertanika**, 15: 93–98, 1992.

RESTREPO, J. P. G.; ROJAS, E. I. L. A.; PISCO, R. R. Phenology of cocoa tree in a tropical moist forest. **Científica**, Jaboticabal, v. 45, n. 3, p. 240-252, 2017.

SALES, R. P. et al. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto e preparo convencional no semiárido. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 47, n. 3, p. 429-438, 2016.

SÁNCHEZ, S. E. M. **Cacau e graviola: Descrição e danos das principais pragas-de-insetos**. EDITUS: Ilhéus, 147 p, 2011.

SANTOS, D. P. et al. Construção, instalação, calibração, performance e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem cultivados com cana-de-açúcar. **Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 4, p. 1606-1616, 2017.

SANTOS, I. C. et al. Comparative analysis of methods of determining leaf area in cocoa genotypes. **Bioscience Journal**, Uberlandia, v. 30, n. 1, p. 411-419, 2014.

SCHAWWE, C. C. et al. Gene flow and genetic diversity in cultivated and wild cacao (*Theobroma cacao* L.) in Bolivia. **American Journal of Botany**, v. 100, n. 11, p. 2271-2279, 2013.

SCHOLL, P.; LEITNER, D. et al. Root induced changes of effective 1D hydraulic properties in a soil column. **Plant and Soil**, v. 381, n. 1-2, p.193-213, 2014.

SEDIYAMA, G. C. 1996. Estimativa da evapotranspiração: Histórico, evolução e análises crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. i-xii, 1996.

SHAO, H. B. et al. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. **Comptes Rendus Biologies**, v. 331, n. 3, p. 215-225, 2008.

SILVA, M. P. et al. Plantas de cobertura e qualidade química e física de Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto. **Ciências Agrárias**, Recife, v. 12, n. 1, p. 60-67, 2017.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; QUEIROZ, D. M.; Spatial variability in nutritional status of arabic coffee based on dris index. **Revista Ceres**, v. 58, n. 2, p. 256-26, 2011.

SILVA NETO, P. J. et al. **Sistema de produção de cacau para a Amazônia Brasileira**. Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira, Belém, PA, 2001. 125p.

SILVA, F. C. **Uso de dispositivos lisimétricos para medida da evapotranspiração de referência**. 1996. 70 f. Tese (Doutorado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura Luíz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

SINDONI, N. R. **Beneficiodel cacao** (*Theobroma cacao* L.). Venezuela: Facultad de Agronomía de La Universidad Central de Venezuela. Caracas, 2006. 32p.

SIQUEIRA, P. R. et al. **Efeito da irrigação na produtividade do cacauero** (*Theobroma cacao* L.) **em Linhares, ES, Brasil**. 12th International Cocoa Research Conference. Salvador, BA, Brasil, 1996. 867-877p.

SIQUEIRA, P. R.; MULLER, M. W.; PINHO, A. F. S. Efeito da irrigação na produtividade do cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.). **Anais...** XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA. Jundiaí, SP. 1987. v. 7, p. 116-127.

SIQUEIRA, P. R. 2018a. **A importância da irrigação para o cacau em Linhares**. Disponível em: <<http://www.ceplac.br.htm>>. Acesso em 02 Maio de 2018.

SIQUEIRA, P. R.; MULDER, W. T. J.; SOUZA, C. A. S. 2018b. **Fertirrigação do cacauzeiro no estado do Espírito Santo**. Disponível em: <<http://www.ceplac.gov.br.htm>>. Acesso em: 02 maio de 2018.

SOLORZANO, R. G. L. et al. **Statistics**. Cocoa year 2014/2015. London: ICCO, v. 41, n. 1, p. 10, 2015.

STEFANOSKI, D.C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. Revista Brasileira de **Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.

TABARI, H.; GRISMER, M. E.; TRAJKOVIC, S. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. **Irrigation Science**, New York, v. 31, n. 2, p. 107-117, 2013.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Publication in Climatology**, Laboratory of Climatology, Centerton, v. 8, n. 1. 1955.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

TUCCI, M. L. S. et al. Teores de gordura e ácidos graxos de clones de cacau nas condições do Vale do Ribeira (SP). **Bragantia**, 55: 207-213, 1996.

VALLE, R. R. M. **Ciência, tecnologia e manejo do cacauzeiro**. Brasília, DF: MAPA, 2012. p. 688.

VALENTE, S. D. M. et al. Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. **Scientia Agrícola**, v. 69, n. 3, p.173-179. 2012.

VELLAME, L. M. et al. Lisímetro de pesagem e de lençol freático de nível constante para uso em ambiente protegido. **Caatinga**, v. 25, n. 1, p. 153-159, 2012.

VOGEL, G. F. et al. Avaliação dos penetrômetro de impacto e eletrônico na determinação da resistência mecânica a penetração do solo. **Scientia Agrária**, Curitiba, v. 18, n. 3, p. 30-36, 2017.

ZIEBA, Z. Influence of soil particle shape on saturated hydraulic conductivity. **Journal Hydrology, Hydromech**, v. 65, n. 1, p. 80-87, 2017.

ZUIDEMA, P. A. et al. A physiological production model for cocoa (*Theobroma cacao* L.): model presentation, validation and application. **Agricultural Systems** 84: 195-225, 2005.

CAPITULO 1

ANÁLISE DE ERRO EM LISÍMETRO DE PESAGEM PARA AVALIAÇÃO DA DEMANDA HÍDRICA DE CACAUEIRO¹

¹ Artigo ajustado e submetido ao Comitê Editorial do periódico científico: Revista Caatinga

CALIBRAÇÃO DE UM LISÍMETRO DE PESAGEM PARA MEDIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE CACAUEIRO

RESUMO: Lisímetros de pesagem bem operados e calibrados determinam com confiabilidade a demanda hídrica de culturas agrícola, sendo a qualidade dos dados, avaliada através das análises de erros atribuídos ao instrumento. Objetivou-se com o presente estudo, determinar parâmetros de desempenho de um lisímetro de pesagem e avaliar a sua adequação à determinação direta da evapotranspiração da cultura do cacau. O lisímetro de 1,44 m² de superfície, apoiado sobre quatro células de carga foi instalado na área experimental do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, foi calibrado as 3:00 horas da manhã, utilizando massas conhecidas em intervalos de 02 minutos em cinco ciclos de incrementos e retiradas. Os dados foram coletados utilizando um datalogger acoplado a quatro células de carga com capacidade individual de 1000 kg, programado para efetuar leituras a cada 01 segundo, com armazenamento das médias de 15 minutos. O lisímetro apresentou excelente precisão com r^2 superior a 0,99 de correlação entre as massas padrão e o sinal das células de carga e erro padrão de estimativa da regressão linear de 0,03 mm. A combinação dos erros de repetitividade e histerese com uma incerteza de 0,19% mostrou que as células de carga tem acurácia de $\pm 0,07$ mm e com resolução de 0,00033 mV e sensibilidade para detectar mudanças de massa inferior 0,1 mm, o sistema é adequado para medição direta da ETc do cacau em intervalos de tempo inferiores a uma hora.

Palavras-chave: *Theobroma cacao* L. Instrumentação agrícola. Demanda hídrica de culturas.

CALIBRATION OF A WEIGHING LISIMETER FOR MEASUREMENT OF EVAPOTRANSPIRATION COCOA

ABSTRACT: Weighing lysimeters that are well operated and calibrated determine reliably the water demand for agricultural crops, and the quality of the data is assessed through the analysis of errors attributed to the instrument. The aim of this study was to determine performance parameters of a weighing lysimeter and to evaluate its suitability for the direct determination of evapotranspiration of the cocoa crop. The lysimeter of 1.44 m² of surface, supported on four load cells, installed an experimental area of the Postgraduate Program in Agricultural Engineering at the Universidade Federal do

Recôncavo da Bahia was calibrated at 3:00 am, using known masses at 02 minute intervals in five cycles of increments and withdrawals. Data were collected using a datalogger coupled to four load cells with a maximum capacity of 1000 kg, programmed to take readings every 01 seconds, with storage of the averages of 15 minutes. The lysimeter showed excellent precision with r^2 greater than 0.99 of the correlation between the standard masses and the load cell signal and, standard error of estimation of the linear regression 0.03 mm. The combination of errors repetition and hysteresis with an uncertainty of 0.19% showed that the load cells have an accuracy of ± 0.07 mm and with a resolution of 0.00033 mV and sensitivity to detect changes in mass less than 0.1 mm, the system is suitable for direct measurement of cocoa ETC at intervals of less than one hour.

Keywords: *Theobroma cacao* L. Agricultural instrumentation. Water demand crops.

INTRODUÇÃO

As culturas agrícolas têm sua produtividade dependente do fator hídrico que regulam suas atividades fisiológicas e metabólicas (LIMA et al., 2014). Levando em consideração a variabilidade temporal e espacial das chuvas, determinar o quanto de água as plantas perdem para a atmosfera torna-se fundamental no planejamento da irrigação, que considera a demanda evapotranspirométrica de cada espécie (VELLAME et al., 2012).

Geralmente, a demanda hídrica das plantas é determinada indiretamente, estimando sua evapotranspiração pela quantificação das perdas totais de água para a atmosfera (SCHMIDT et al., 2013), uma vez que os lisímetros de pesagem, por serem de difícil operação e instalação, são utilizados apenas em pesquisas experimentais.

Na literatura, informações da demanda hídrica de plantas de cacau são escassas, porém necessárias, principalmente quando se deseja trabalhar com cultivos irrigados. Com isso, os lisímetros de pesagem, se bem operados e calibrados, determinam com confiabilidade as necessidades hídricas das culturas agrícolas (SILVA et al., 2019), que, de acordo com Lima et al. (2011), variam entre os estádios de crescimento e desenvolvimento, sendo consideradas por meio de seus coeficientes de cultivo (K_c).

Isso faz com que a lisimetria seja uma técnica a ser utilizada com mais frequência nas pesquisas que buscam informações a respeito do consumo hídrico das culturas agrícolas, sendo considerada excelente nas medidas diretas da evapotranspiração da cultura e de referência (HOWELL et al., 1995; FLUMIGNAN et al., 2011; NASCIMENTO, et al., 2011; SILVA et al., 2019).

A lisimetria tem a vantagem de determinar o consumo de água pelas plantas em períodos inferiores a um dia e, com isso, os coeficientes de cultivo podem ser melhor determinados em todas as fases da cultura. Isso justifica os vários tipos de lisímetros com tamanhos, materiais e até mesmo formas diferentes, que são citados na literatura (CAMPECHE et al., 2011; NASCIMENTO et al., 2011; REICHARDT; TIMM, 2012; SILVA et al., 2019).

De acordo com Nascimento et al. (2016), antes do uso de qualquer lisímetro, deve-se realizar uma análise criteriosa, principalmente dos mecanismos de pesagem, a fim de se conhecer e quantificar os erros atribuídos aos equipamentos, que por sua vez estão relacionados às células de carga, aos cabos, ao sistema de coleta de dados e à própria estrutura a ser pesada.

Desse modo, a calibração do lisímetro de pesagem é a etapa mais importante de um trabalho que visa o uso desse equipamento para medir com confiabilidade a evapotranspiração de culturas agrícolas e a determinação dos coeficientes de cultivos; ela pode ser realizada antes e durante o uso dos lisímetros, sendo útil na tomada de decisões a respeito dos dados que devem ou não ser utilizados no computo da ET.

Diante do exposto, o estudo teve por objetivo determinar parâmetros de desempenho de um lisímetro de pesagem e avaliar a sua adequação à determinação direta da evapotranspiração da cultura do cacau.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em uma área de 4.868,9 m² do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), no município de Cruz das Almas, Bahia, Brasil, com coordenadas geográficas 12° 40' 12" S e 39° 6' 7" W, e altitude média de 220 m.

Segundo a classificação de Köppen-Geiger (KOTTEK et al., 2006), o clima da região é do tipo Am, tropical quente úmido, em que o período mais seco ocorre entre os meses de setembro a março e o de maior concentração das chuvas, abril a agosto. A pluviosidade média anual é de 1.170 mm com variações entre 800 e 1.400 mm, umidade relativa do ar de 80.0%, temperatura média anual é em torno de 24,5°C e velocidade média do vento de 3,1 m s⁻¹ (GUIMARÃES et al., 2016).

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Amarelo Distrocoeso, de textura franco-arenosa, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos

(SANTOS et al., 2018) e, com classificação correlata na Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014) Typic Haplustox e, na WRB/FAO (2015) Ferralsol.

O lisímetro de pesagem foi instalado no centro de um pomar de cacau e é composto por uma caçamba metálica em aço carbono, com dimensões de 1,20 x 1,20 x 1,20 m, totalizando uma área de 1,44 m² de superfície (Figura 1).



Figura 1. Cultivo de cacau clonal - CCN 51 em uma caixa lisimétrica (A) instalada sobre quatro células de carga (B).

A instalação do lisímetro foi realizada após escavação manual do solo, para evitar o desmoronamento das paredes laterais, essas foram revestidas de argamassa armada de 0,15 m de espessura. O espaço inferior entre o tanque interno e o externo foi revestido por uma camada de brita, para favorecer a drenagem da água das chuvas entre os dois tanques. O preenchimento do lisímetro foi feito com o solo retirado do próprio local da escavação, mantendo-se a sequência e a profundidade dos horizontes originais.

Um tubo de PVC de 0,05 m de diâmetro foi instalado sob uma camada de brita no tanque interno, para drenar o excesso de água no lisímetro durante os eventos de irrigação e precipitação, a fim de evitar redução da aeração do solo (Figura 1B).

O suporte para os elementos sensíveis do lisímetro (células de carga) foi construído em estruturas metálicas retangulares com viga “U” de 150 mm, nas dimensões de 0,79 m x 0,55 m apoiada sobre quatro sapatas de concreto, com diâmetro de 0,15 m e altura de 0,20 m. Na estrutura foram parafusadas quatro células de carga, modelo Z-1T da Alfa

Instrumentos, com capacidade individual de 1000 kg e que de acordo com o fabricante, possuem sensibilidade de $2 \text{ mV V}^{-1} \pm 0,1\%$ de aproximadamente 10.000 divisões correspondendo a 0,1kg; erro combinado de 0,03% do final de escala e com a “input range” recomendado de 10 mV V^{-1} (resolução de 0,00033 mV), a capacidade total das quatro células de carga de 4000 kg corresponde a saída da balança de 13,2 mV.

Um datalogger (CR1000, Campbell Sci) foi instalado próximo ao lisímetro para armazenamento dos dados. O datalogger realizava leituras a cada 01 segundo, sendo programado para armazenar as médias das medidas das quatro células de carga a cada 15 minutos, sendo os dados armazenados, transferidos para um computador. A potência elétrica para alimentar o sistema era fornecida por bateria de 12 V, acoplada a uma placa solar.

A calibração do lisímetro cultivado com uma planta de cacau em pleno desenvolvimento foi realizada na ausência de brilho solar, a partir das 03:00 horas da manhã evitando a evaporação do solo em altas temperatura, já que não foi possível cobrir a superfície do lisímetro com lona plástica, além disso, as oscilações nas medidas devido a turbulência do vento também são minimizadas nesse horário; no ensaio foram utilizados 41 sacos plásticos contendo massas conhecidas de 0,05; 0,10; 0,144; 0,20; 0,250; 0,30; 0,40; 0,50; 0,720; 1,44; 2,88; 5,0; 10,0; 20,0 kg de brita nº 1, sendo preparados três sacos para cada peso, com exceção ao de 2,88 kg, que correspondeu a apenas dois sacos. Todos foram pesados em uma balança eletrônica de precisão e posteriormente vedados.

A calibração ocorreu com o incremento e retirada das massas padrão na superfície do lisímetro (Figura 2). A cada incremento de massa esperava-se 2 minutos para estabilização da leitura realizada no datalogger conectado as células de carga, sendo anotado o sinal elétrico (mV) gerado pela deformação delas. O processo inverso também foi realizado, retirando os sacos na mesma ordem e intervalos de tempo em que foram adicionados ao sistema, gerando 81 pares ordenados (mV x kg) para cada um dos cinco ciclos de carga e descarga que simulam as entradas e saídas de massa líquida no conjunto lisimétrico.



Figura 2. Processo de calibração do conjunto lisimétrico.

Com a obtenção das leituras, foi realizada análise estatística de regressão linear, utilizando a planilha eletrônica do software Microsoft Office Excel 2010, possibilitando estabelecer relação linear entre incrementos e retiradas das massas padrão (kg) com o sinal de saída das células de carga em milivoltagem (mV) por volt de excitação, sendo cada sinal elétrico emitido, resultante da soma das quatro células de carga. Essa etapa permitiu avaliar a adequação do método à medição direta da ET_c do cacau pela obtenção dos parâmetros precisão, acurácia, sensibilidade, resolução, repetitividade, histerese e incerteza. Os erros em unidade de massa foram apresentados em percentual de final de escala (%FE).

A precisão foi determinada calculando o erro padrão de estimativa da regressão linear e o índice de concordância de Willmott (1981). Acurácia, pelo desvio máximo obtido entre massa aplicada no lisímetro e sua leitura convertida em massa para todos os ciclos de carga e descarga. Sensibilidade, obtida pela observação da menor variação do sinal em mV nos ciclos de carga e descarga no processo de calibração, sendo confirmado pela observação da menor variação de massa convertido em lâmina para intervalo de uma hora para um dia com chuva e drenagem. Resolução é inerente ao conjunto lisimétrico-célula de carga-datalogger. Repetitividade, determinada pelo maior desvio entre as medidas em sucessivas medições para um dado peso padrão. Histerese, calculada pela máxima diferença em todos os ciclos de leitura entre as medições feitas em ordem crescente e decrescente para um mesmo valor de massa. Incerteza obtida seguindo a metodologia proposta por Gonçalves Jr (2004), através da equação 01.

$$I = \frac{\frac{\sigma.t}{\sqrt{n}}}{C} \quad (02)$$

em quem, I é a incerteza das medições aferidas no lisímetro; t é o coeficiente de Student para as medidas dos cinco ciclos de carga e descarga a 95% de confiabilidade; n é o número de medidas e C é o valor da variável.

A ETc do cacau, foi calculada pela equação 02 (CAMPECHE, 2002), em que a variação de massa (Equação 03) do lisímetro em dias com a ausência de eventos de precipitação e irrigação é negativa e representa a perda de água para a atmosfera por evapotranspiração, uma vez que a massa atual é inferior a massa anterior detectada no sistema de pesagem.

$$ETc = P + I \pm \frac{\Delta ML}{A} - D \quad (03)$$

$$\Delta ML = M_i - M_{i-1} \quad (04)$$

em que, ETc é a evapotranspiração da cultura (mm); P é a precipitação (mm); I é a lâmina de água aplicada via sistemas de irrigação (mm); ΔML é a variação de massa do lisímetro (kg); A é a área do lisímetro (m²); D é a drenagem (mm); M_i é a massa atual do conjunto e M_{i-1} é a massa anterior do conjunto para o período de tempo considerado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da calibração do lisímetro de pesagem dessa pesquisa são observados na figura 3. O modelo linear descreveu adequadamente a relação entre as massas nos processos de incremento e retiradas e o sinal de saída das células de carga, em que a correlação foi acima de 0,99 com erro padrão de estimativa da ordem de 0,042 kg ou 0,03 mm, e inclinação da curva de calibração de 524,69585 kg mV⁻¹ ou 0,002 mV kg⁻¹, indicando a sensibilidade do sistema de medição e datalogger segundo Schmidt et al. (2013).

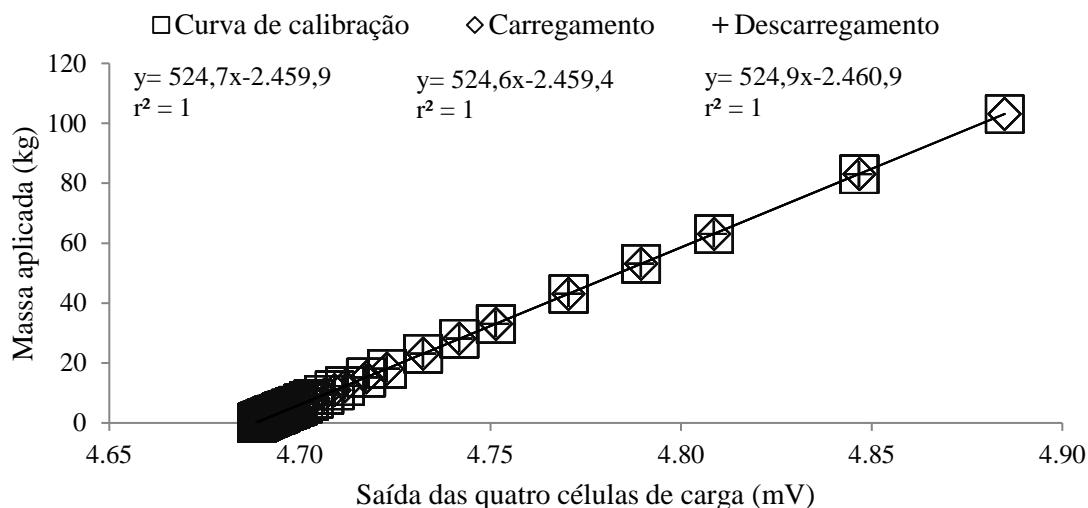


Figura 3. Resposta da balança aos incrementos e retiradas de massas aplicadas no lisímetro.

O modelo linear também descreve muito bem a relação entre os incrementos e retiradas das massas padrão com as massas mensuradas com valores superiores a 0,99 de correlação (Figura 4), além disso, o índice de concordância de Willmott $d = 1$, calculado para o conjunto total dos dados, mostra o ótimo desempenho do instrumento em gerar dados com baixa dispersão em repetitivas medições.

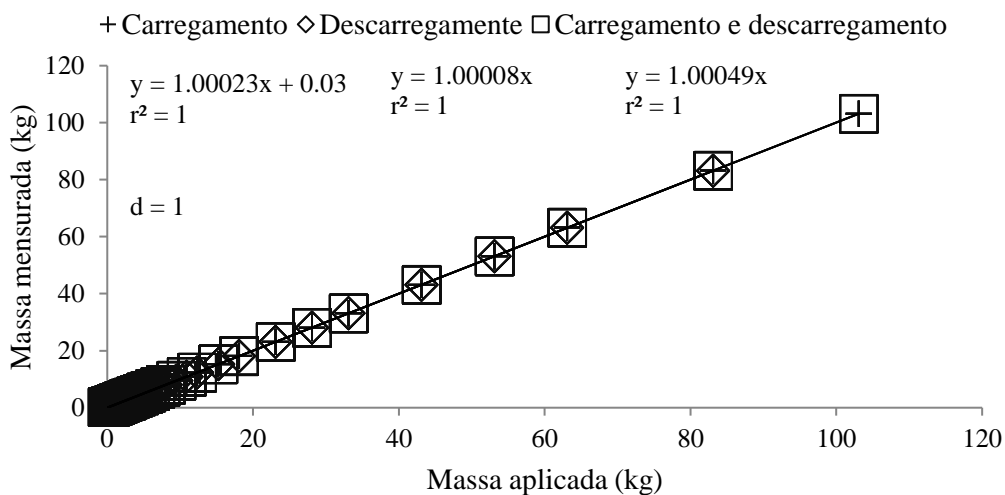


Figura 4. Relação entre massa aplicada e mensurada nos ciclos de carregamento e descarregamento da calibração do lisímetro com uma planta jovem de cacau.

Os elevados coeficientes de determinação obtidos nas curvas de calibração e o erro padrão de estimativa da regressão linear retratam que o lisímetro de pesagem da presente pesquisa tem alta precisão semelhante a obtida por Schmidt et al. (2013) que ao calibrarem

um lisímetro de pesagem para estudo de demanda de água do fumo (*Nicotiana tabacum* L.), obtiveram erro padrão de 0,03 mm.

Porém, ao comparar os resultados desta pesquisa com outras calibrações, a precisão foi elevada. Carvalho et al. (2013) ao calibrar três lisímetros de pesagem para a determinação da evapotranspiração da cultura do café em Uberlândia-MG, obtiveram erros padrões de estimativas da ordem de 0,2, 0,08 e 0,66 mm; Campeche et al. (2011) e Mendonça et al. (2007) ao calibrarem um lisímetro de pesagem de grande porte, obtiveram precisão de 0,228 mm e 0,09 mm respectivamente e Faria et al. (2006) ao calibrarem 10 lisímetros de pesagem, obtiveram erro padrão entre 0,07 mm e 0,42 mm.

A combinação dos erros associados ao sistema, durante o processo de calibração de $\pm 0,1$ kg são condizentes com as informações disponibilizadas pelo fabricante. E são eles que melhor qualificam o método, visto que a incerteza das medições não pode ser visualizada com a análise de regressão, que tão pouco expressa a acurácia das medidas realizadas por ele. Esse parâmetro é fortemente influenciado pelos erros de linearidade em que no processo de calibração desta pesquisa são os de repetitividade (desvio máximo e incerteza a 95%), que de acordo com Vellame et al. (2012) são afetado por fatores não controlados no processo de calibração, não podendo ser compensado ou corrigido pela curva de calibração.

Na figura 5 observa-se que o sistema de medidas apresenta acurácia de $\pm 0,18$ kg representando um percentual do fundo de escala (FE) de $\pm 0,16$ %, equivalente a $\pm 0,11$ mm, muito próximo aos valores obtidos por Schmidt et al. (2013) de 0,23 kg , equivalente ao percentual de 0,21% (FE) ou 0,13 mm.

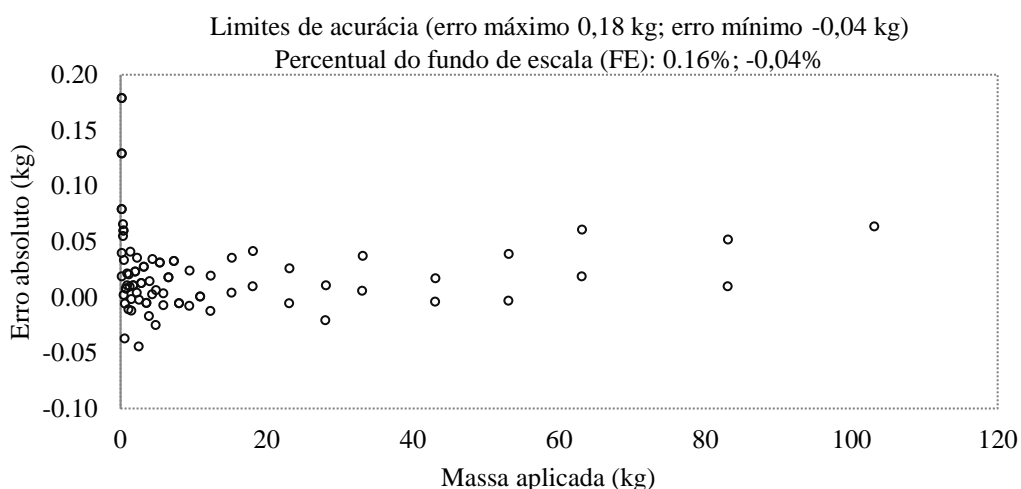


Figura 5. Erro entre massas mensuradas e aplicadas durante a calibração do lisímetro de pesagem cultivado com uma planta jovem de cacau.

A acurácia, apesar de ser um indicador do parâmetro de desempenho do método que geralmente sofre influencia de parâmetros que não podem ser controlados, obteve baixa influencia deles. A combinação de erros obtidos nesse processo de calibração estar dentro de limites aceitáveis de $\pm 0,1$ kg ou $\pm 0,07$ mm, muito próximo ao obtido por Campeche et al. (2011) de 0,08 mm.

Pela figura 6, é possível observar que os erros de repetitividade, incerteza (95%) e histerese são da ordem de 0,044 kg, 0,22 kg e 0,031 kg respectivamente, cujo percentual desses erros encontra-se dentro de limites aceitáveis, visto que cada célula de carga em sua capacidade máxima apresentam um erro combinado de $\pm 0,03\%$ (FE).

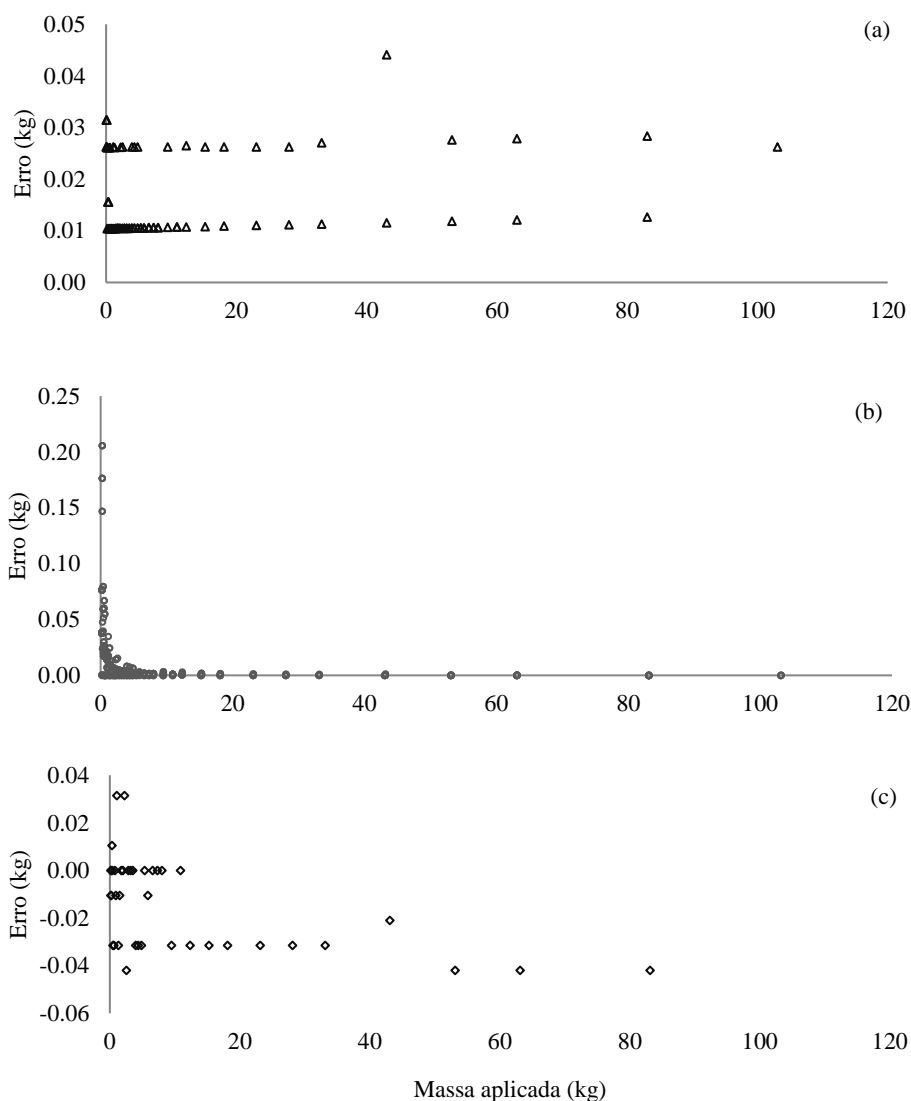


Figura 6. Erros de repetitividade (a), incerteza a 95% (b) e histerese (c) na obtenção das massas mensuradas em relação às massas aplicadas no processo de calibração do lisímetro de pesagem, cultivado com uma planta jovem de cacau.

O erro de repetitividade de 0,044 kg obtido na calibração do conjunto lisimétrico desta pesquisa que representa 0,04% (FE) ou 0,03 mm é semelhante ao obtido por Vellame et al. (2012) que ao calibrarem dois lisímetros de pesagem obtiveram 0,023% e 0,042% (FE) e inferior ao obtido por Schmidt (2008) de 0,18% (FE).

O erro de histerese de 0,031 kg, representando 0,03% (FE) ou 0,02 mm é semelhante ao obtido por Vilela et al. (2015) que ao calibrarem um mini-lisímetro de pesagem obtiveram 0,02 kg e por Vellame et al. (2012) de 0,019% e 0,015% (FE). Esses erros foram praticamente iguais. A baixa dispersão pode está associada a todos os cuidados tomados na operação do sistema ao longo do processo de calibração, como adição e retirada das massas, o próprio intervalo utilizado para a estabilização das leituras e o horário em que foram realizadas, com o objetivo de minimizar ao máximo os efeitos externos ao processo.

Portanto, sem maiores erros e com uma precisão elevada, o lisímetro da presente pesquisa apresenta excelente desempenho, podendo ser utilizado para a realização de medidas com confiabilidade, visto que as medições apresentaram incerteza de 0,22kg, que segundo Allen et al. (2011) para células de carga os valores esperados de incerteza encontram-se em uma faixa que varia de 5 a 15%, e assumindo o valor percentual de final de escala de 0,19% para as medidas nesse processo de calibração, o método escolhido apresenta incerteza de medição dentro do esperado.

Além disso, as células de carga operam com resolução de 0,33 μV ou 0,00033 mV, correspondendo a 0,150 kg ou 0,10 mm, detectado no datalogger durante o processo de calibração. A menor variação do sinal observada no lisímetro capaz de provocar uma mudança na medição também foi observada com a adição da massa de 150 g. Pelos resultados obtidos na calibração, a balança apresenta sensibilidade capaz de detectar variação de massa da ordem de $\pm 0,1\text{mm}$. Na prática esses valores foram confirmados por meio das medições realizadas em intervalos de tempo de 1 hora no período de 24 horas (Figura 7).

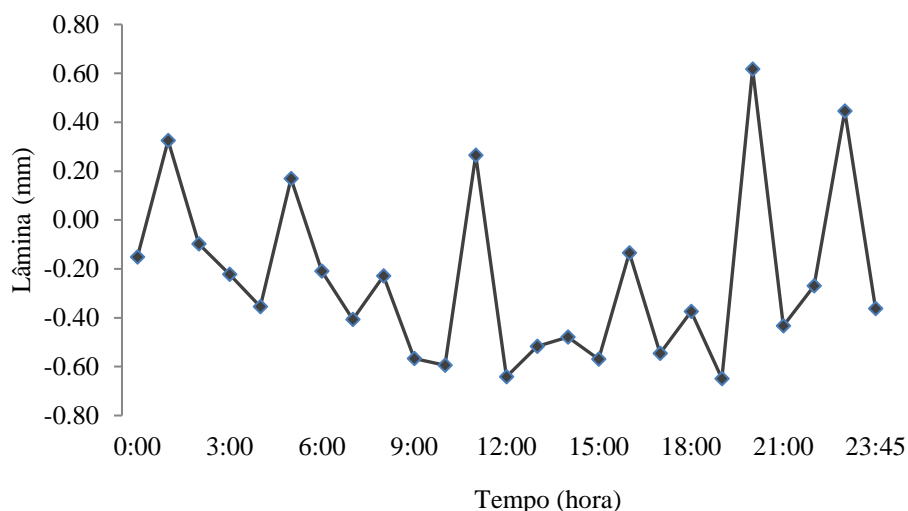


Figura 7. Sensibilidade no conjunto lisimétrico às mudanças de massa durante um dia com precipitação e drenagem para o dia 1 de agosto de 2017.

Na prática, a sensibilidade determinada por esse sistema foi de $-0,09$ mm, inferior a determinada por Nascimento et al. (2011) de $0,00001$ mm e, superior a determinada por Campeche et al. (2011) de $0,19$ mm. Desse modo, a sensibilidade obtida nesse lisímetro encontra-se dentro de limites aceitáveis, pois segundo esses pesquisadores equipamentos cuja sensibilidade seja muito alta, estão sujeitos a alguns problemas, quando operados em campo e com plantas de porte elevado, como o efeito do vento, que produz oscilações instantâneas nas medidas.

Após avaliação de desempenho do método, comprovando sua capacidade em determinar o consumo hídrico da cultura do cacau com confiabilidade, foi determinada variações de massa e calculado a evapotranspiração da cultura do cacau para dias sem a ocorrência de eventos de precipitação e irrigação e para dias com o registro de eventos de precipitação (Figura 8 e 9).

As variações de massa em intervalos de uma hora detectadas no dia 1 de março de 2017, sem a ocorrência de eventos de precipitação e irrigação, mostram que o decréscimo das massas durante o dia foi maior em relação ao período noturno, ocasionada pela demanda evaporativa que também foi maior nesse período (Figura 8a), mantendo-se mais constante durante a noite. A velocidade do vento também é um fator que influenciou nas medidas, e para este dia foi observada média de $2,8$ m s⁻¹, com pico de $5,7$ m s⁻¹ às 17:00 h (Figura 8b).

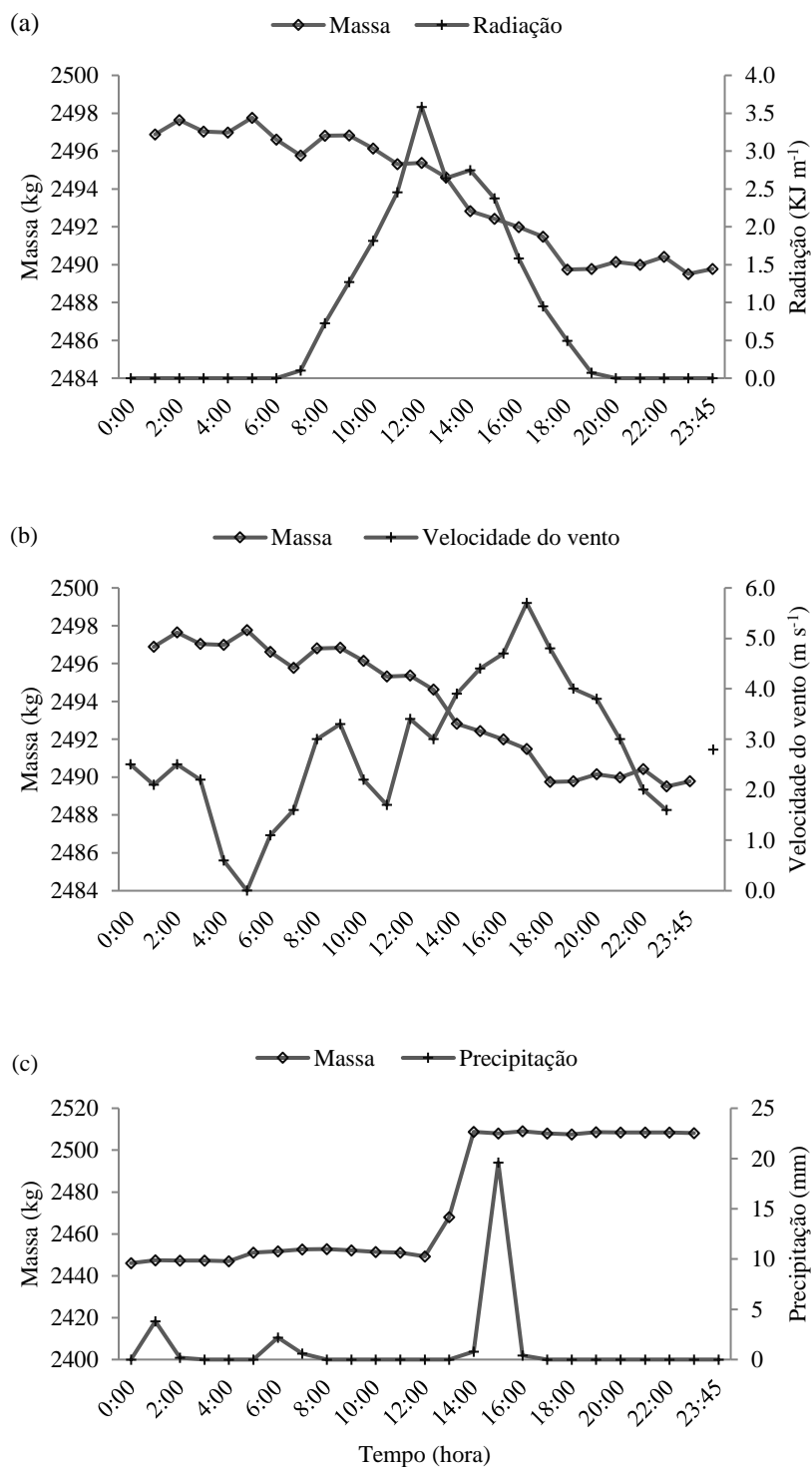


Figura 8. Variação de massa no lisímetro no dia 1 de março de 2017, sem a ocorrência de precipitação e irrigação em relação às condições meteorológicas radiação (a) e velocidade do vento (b) e variação de massa para o dia 18 de março de 2017, com precipitação (c) e drenagem constante.

Os resultados da presente pesquisa corroboram com os resultados apresentados por vários pesquisadores, que notaram efeitos negativos provocados pelas oscilações do vento nas medidas lisimétricas (PRUITT; ANGUS, 1960; VAN BAVEL; MYERS, 1962; ROSENBERG, 1969; BERGAMASCHI et al., 1997; CAMPECHE, 2002; CAMPECHE et al., 2011; NASCIMENTO et al., 2011), sendo mais recomendável aumentar o intervalo da coleta de dados para minimizá-los (HOWELL et al., 1995).

Além da velocidade do vento, outro fator limitante à aferição correta das medidas de massa líquida no sistema, são os eventos de precipitação e drenagem, sendo observado na análise de funcionamento do lisímetro (Figura 8c), um pico na curva devido às entradas de massa líquida no sistema, que ocorreu durante esse dia. Esses eventos influenciaram as medidas de massa, sendo observadas variações crescentes ao longo do dia, portanto, é recomendável eliminar os dias com precipitações e drenagem, por não ter como separar as saídas por evapotranspiração da cultura daquelas por drenagem, sendo na presente pesquisa, utilizados apenas para avaliar o funcionamento do lisímetro em dias atípicos.

Na literatura, alguns pesquisadores como Nascimento et al. (2011), Lima et al. (2013), Nascimento et al. (2016), e Santos et al. (2017), também notaram que as medidas de evapotranspiração aferidas em lisímetros de pesagem, foram influenciadas pelos eventos de precipitações constantes ao longo do dia.

Na figura 9, estão expressas medidas de lâminas evapotranspiradas pela cultura do cacau ao longo de um dia, com e sem os registros de precipitação, em que se observa uma tendência de decréscimo dos valores no período noturno.

Esse comportamento é justificável devido à demanda atmosférica, em que, dentre vários fatores, o que mais influencia é a radiação solar, visto que, no período noturno, após o por do sol, ela passa a ser zero. Não sendo suficiente para promover energia necessária que ocasione altas saídas de massa de água do sistema, ficando estes, dependentes de outros fatores como as condições aerodinâmicas do ar e da energia acumulada pelo próprio sistema (NASCIMENTO et al., 2011).

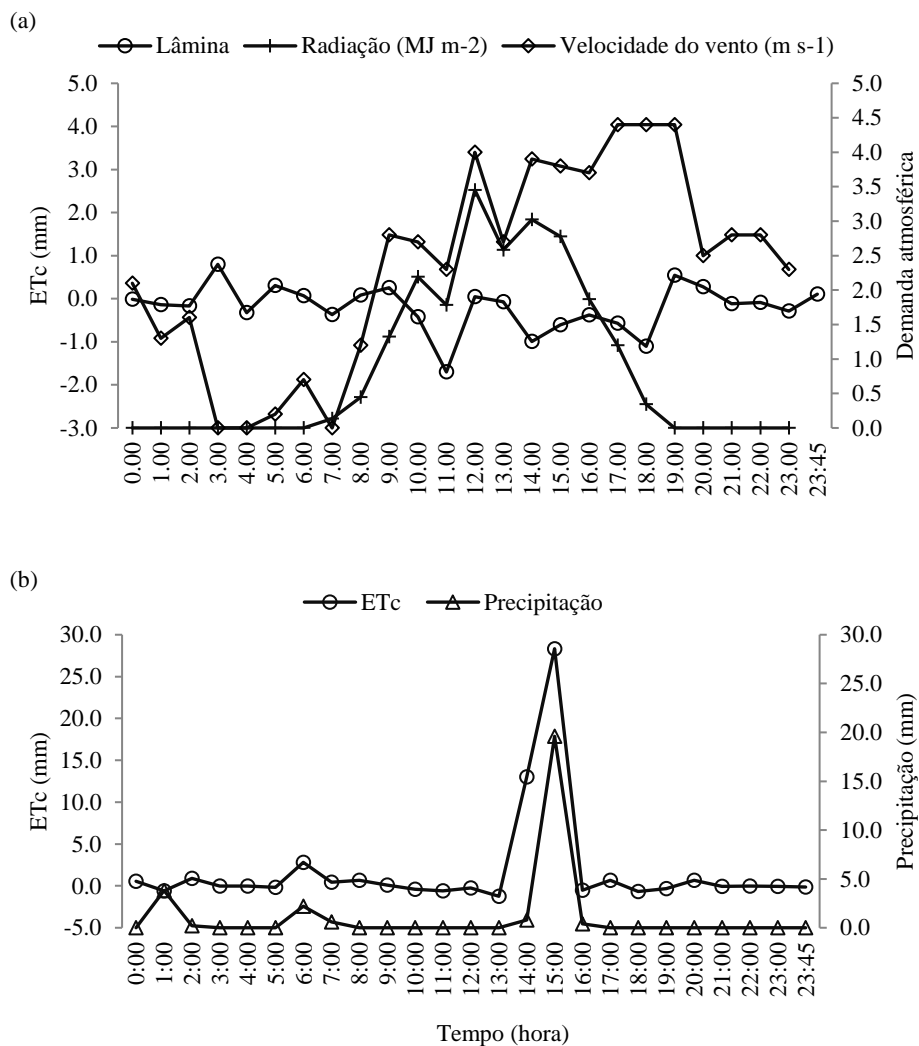


Figura 9. Lâmina evapotranspirada pela planta de cacau em intervalos de uma hora para o dia 2 de outubro de 2017, com ausência de precipitação e irrigação em relação à demanda evaporativa do ar (a) e lâminas evapotranspiradas para o dia 18 de março com irrigação e drenagem constantes (b).

Na figura 9a observou-se que essa tendência não ocorreu durante todo o período em que a radiação solar global era zero, podendo-se observar aumento nos valores de saída de massa entre 0:00 e 5:00 horas e após as 18:00. A turbulência do vento influi nas medidas de ETc, em que as oscilações foram de $0,0 \text{ m s}^{-1}$ às 3:00 horas e $4,4 \text{ m s}^{-1}$ nos horários das 17:00, 18:00 e 19:00 horas (Figura 9a), portanto, o poder aerodinâmico do ar é um dos fatores que mais influi nas saídas de massa do sistema à noite.

Reforçando o quanto a demanda atmosférica influi no processo evapotranspirométrico, ao comparar os dois períodos, observou-se que os maiores valores

de ET_c medidos se deram justamente no período diurno, sendo registrados saídas de massa de até -1,7 mm às 11:00 horas.

Na literatura, alguns autores também observaram que a evapotranspiração segue a tendência da demanda atmosférica, em que Pruitt; Angus (1960), Van Bavel; Myers (1962), Rosenberg (1969), Bergamaschi et al. (1997), Santiago (2001), Campeche (2002) e Campeche et al. (2011) verificaram variações nas medidas de ET_c em seus lisímetros ocasionadas pelo vento.

Já a influência da radiação nas medidas de ET_c por lisimetria foram observadas por Pereira et al. (2002) que, ao determinarem a ET_c, obtiveram aproximadamente 85,0% dos valores no período diurno, e Campeche et al. (2011) que ao analisar o funcionamento de lisímetros de pesagem determinando a variação de massa em dois dias atípicos, com e sem chuva, observaram um pequeno percentual de saídas de massa líquida no período noturno em ambos os dias, devido ao poder aerodinâmico do ar.

Além do poder advectivo e evaporante do ar (vento e radiação), a precipitação também influi nas medidas de ET_c das culturas realizadas com lisímetros de pesagem. No presente estudo elas foram fortemente afetadas com os eventos de precipitação.

Na figura 9b foi realizada uma análise para determinar a ET_c em dia com precipitação e drenagem constantes, sendo observados valores de lâminas positivas durante o período avaliado, que correspondem às entradas de massa líquida no conjunto lisimétrico.

As maiores entradas de massa no sistema ocorreram entre os horários diurnos (Figura 9b), ocasionadas pelas maiores precipitações registradas para o dia considerado. Também foi observada saída de massa em todos os períodos, diurno e noturno, apresentando valores considerados elevados para o dia e, principalmente, durante a noite, em que não há radiação suficiente para evaporar massas tão altas de água, mesmo que a superfície evapotranspirante absorvesse uma energia de 2,45 MJ, que equivale à energia utilizada para evaporar 1,0 mm de água (PEREIRA; SEDYAMA; VILLA NOVA, 2013), sendo essas, provavelmente lâminas drenadas.

Na presente pesquisa, os resultados mostraram que, em dias sem e com a ocorrência de eventos de precipitação, o comportamento dos dados é completamente diferente. Nos dias chuvosos há acréscimo/decrécimo de massa no sistema, em que o cômputo da lâmina não corresponde à evapotranspirada pela cultura. Já em dias não chuvosos, o decréscimo de massa do sistema ocorre durante todo o período avaliado, podendo-se observar o consumo de água pela cultura ao longo do período avaliado. Nos dias avaliados, 1 de

março e 2 de outubro de 2017 (Figuras 8a, 8b e 9a) sem ocorrência de precipitação e irrigação, e no dia 18 de março (Figuras 8c e 9b) com ocorrência de precipitação e drenagem, as lâminas medidas no lisímetro foram de -4,43 mm, -4,48 mm e 42,27 mm respectivamente.

Apesar dos lisímetros de pesagem serem equipamentos eficientes nas determinações acuradas da evapotranspiração, algumas variáveis meteorológicas como a precipitação acabam dificultando o monitoramento do consumo hídrico da cultura, quando realizadas medidas de ET_c pelo balanço de massa. Desse modo, mesmo que o sistema apresente excelente precisão, acurácia e resolução, alguns cuidados devem ser tomados na sua operação e no tratamento dos dados.

CONCLUSÕES

O lisímetro aqui apresentado é tecnicamente adequado para a determinação direta da ET_c do cacau, com excelente acurácia, resolução e sensibilidade capaz de detectar pequenas mudanças de massa, em intervalos inferiores a 1 hora.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB, pela concessão da bolsa de Doutorado; Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas de Nível Superior – CAPES; Universidade Federal do Recôncavo da Bahia; Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia pelo apoio a pesquisa; Professores Lucas Melo Vellame, pelo apoio e orientação na instalação e operação do sistema e Maurício Antônio Coelho Filho, pela orientação nos processo de análise dos dados e a escrita do documento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G. et al. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 98, p. 899 – 920, 2011.

BERGAMASCHI, H. et al. Automação de um lisímetro de pesagem através de estação meteorológica, a campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10, 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBA, 1997. p. 222-224.

CAMPECHE, L. F. S. M. et al. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte I: Desenvolvimento e calibração. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n. 5, p. 519-525, 2011.

CAMPECHE, L. F. S. M. **Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida "Tahiti" (*Citruslatifolia* Tan.)** – SP. 2002. 67 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) - ESALQ Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

CARVALHO, H. P. et al. Desenvolvimento de lisímetros de pesagem na cultura do café. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 6, p. 1750-1760, 2013.

FARIA, R. T.; CAMPECHE, F. S. M.; CHIBANA, E. Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, p.237-242, 2006.

FLUMIGNAN, D. L. **Lisímetros de pesagem direta para o estudo do consumo hídrico do pinhão manso (*Jatropha curcas* L.)**. 2011. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome, 2015. 192p.

GONÇALVES JR, A. A. Laboratório de Metrologia e Automatização Dep. de Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina. **Apostila de metrologia Parte 1**, 2004. 120p. Disponível em: <<http://www.unifenas.br/radiologia/biblioteca>>. Acesso em: 15/042020.

GUIMARÃES, M. J. M. et al. Balanço hídrico para diferentes regimes pluviométricos na região de Cruz das Almas-BA. **Ciências Agrárias** (Belém), v. 59, p. 252-258, 2016.

HOWELL, T. A. et al. Calibration and scale performance of Bushland weighing lysimeters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 38, n. 4, p. 1019-1024, 1995.

KOTTEK, M. et al. **World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated**, **MeteorologischeZeitschrift**, Germany, 2006, pp. 259-263.

LIMA, D. P. et al. Evapotranspiração real diária em sub-bacias do Paracatu, utilizando produtos do sensor Modis. **Ceres**, v. 61, n. 1, p. 017-027, 2014.

LIMA, N. S. et al. Desempenho de um lisímetro de pesagem hidráulica com transdutor de pressão hidrostática e sistema manométrico. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 3, p. 540-557, julho-setembro, 2013.

LIMA, J. R. S. et al. Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro. **Ciência Agrônômica**, v. 42, n. 1, p. 65–74, 2011.

MENDONÇA, J. C. et al. Determinação do coeficiente cultural (Kc) do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), em Campos dos Goytacazes - RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.5, p.471-475, 2007.

NASCIMENTO, A. H. C. et al. Desempenho de um lisímetro de pesagem hidráulica com diferentes sistemas de leitura. **Irriga**, Botucatu, v.13, n.5, p.232- 245, 2016.

NASCIMENTO, E. F. do. et al. Construção e calibração de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração e coeficiente de cultivo em videira de vinho cv. Syrah. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 3, p. 271-287, julho-setembro, 2011.

PEREIRA, A. R.; SEDYMA, G. C.; VILLA NOVA, N. A. **Evapotranspiração**. Campinas: FUNDAG, 2013. 323p.

PEREIRA, A. R. et al. Problemas operacionais com lisímetro de pesagem durante a estação chuvosa e em dias secos com rajadas de vento. **Agrometeorologia**, v. 10, p. 51-56, 2002.

PRUITT, W. O.; ANGUS, D. E. Large weighing lysimeter for measuring evapotranspiration. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v. 3, n. 2, p. 13-18, 1960.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**, 2. ed. Barueri: Manole, 2012. 500 p.

ROSENBERG, N. J. Evaporation and condensation on bare soil under irrigation in the East Central Great Plains. **Agronomy Journal**, Madison, v. 61, p. 557-561, 1969.

SANTOS, H. G. DOS. et al. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 353p.

SANTOS, D. P. et al. Construção, instalação, calibração, performance e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem cultivados com cana-de-açúcar. **Agricultura Irrigada**, v.11, nº. 4, p. 1606 - 1616, 2017.

SANTIAGO, A. V. **Evapotranspiração de referencia medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56), nas escalas mensal e decendial.** Piracicaba 2001 51p. Dissertação Mestrado: ESALQ/USP, 2001.

SCHMIDT, C. D. S. et al. Design, installation and calibration of a weighing lysimeter for crop evapotranspiration studies. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 2, n. 2, p. 77-85, 2013.

SCHMIDT, C. D. S. **Necessidade hídrica da cultura do fumo (*Nicotiana tabacum* L.) tipo Sumatra cultivado em ambiente protegido do Recôncavo da Bahia - BA.** 2008. 70 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias, Área de concentração: Engenharia e Manejo de Irrigação) - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Bahia, 2008.

SILVA, G. S. et al. Análise de erros na determinação direta da evapotranspiração do cacauero jovem atribuídos ao sistema de medição. In: VII Conference - Agronomy, 2019, On-line. **Anais...** On-line: CONVIBRA, 2019.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy.** 12. ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. 372 p. 2014.

VAN BAVEL, C. H. M.; MYERS, L. E. An automatic weighing lysimeter. **Agricultural Engineering**, Saint Joseph, v. 43, p. 580-588, 1962.

VELLAME, L. M. et al. Lisímetro de pesagem e de lençol freático de nível constante para uso em ambiente protegido. **Caatinga**, v. 25, n. 1, p. 153-159, 2012.

VILELA, M. S. et al. Acurácia de um mini-lisímetro de pesagem eletrônica de baixo custo. **Irriga**, Botucatu, v. 1, n. 2, p. 158-167, 2015.

Willmott, C. J. On the validation of models. *Physical Geography*, v.2, p.184-194, 1981.

CAPÍTULO 2

EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTIVO DO CACAU CULTIVADO A PLENO SOL NO RECÔNCAVO DA BAHIA²

² Capítulo ajustado nas normas do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Bahia, Brasil.

EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTIVO DO CACAU CULTIVADO A PLENO SOL NO RECÔNCAVO DA BAHIA

RESUMO: O conhecimento da demanda hídrica de cacauzeiros através das determinações da evapotranspiração da cultura (ETc) e de seus coeficientes de cultivo (Kc), possibilitará ao produtor, aumento na sua produção em função das aplicações corretas de lâminas de água através dos sistemas de irrigação. Dessa forma, objetivou-se no presente trabalho avaliar a demanda hídrica de plantas jovens de cacau cultivadas em campo, determinando a ETc e o Kc durante o ciclo de crescimento e produção. Na área experimental de 4.868,9 m² do Programa de Pós-Graduação em Engenharia agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, em Cruz das Almas, foram transplantadas 530 plantas da variedade CCN 51, com espaçamento de três metros e irrigadas pelo sistema de microaspersão. Mensalmente, realizou-se medidas de crescimento e área foliar das plantas e medidas diárias de ETc e Kc, em uma planta cultivada a pleno sol dentro de um lisímetro de pesagem sustentado por quatro células de carga. A ETc foi determinada pelo balanço de massa e o Kc pela razão da ETc e evapotranspiração de referência (ETo) calculada com a equação Penman-Monteith. A taxa anual da ETc foi de 800,68 mm com média diária de 3,8 mm e Kc médio de 0,92. A demanda hídrica de plantas jovens de cacau, avaliada por meio da ETc e do Kc mostrou o quanto exigente em água a cultura é, sendo que nas fases de crescimento e maturação fisiológica do fruto a ETc foi maior em relação as fases de floração, desenvolvimento e enchimentos do fruto.

Palavras- chave: *Theobroma cacao* L. Tecnologias de produção. Demanda hídrica.

EVAPOTRANSPIRATION AND CROP COEFFICIENT OF COCOA CULTIVATED IN FULL SUN IN THE RECÔNCAVO OF BAHIA

ABSTRACT: Knowledge of the water demand of cocoa through the crop evapotranspiration determinations (ETc) and its crop coefficients (Kc), will allow the producer, increased its production according to the correct application of water through the irrigation systems. Thus, the aim of this study was to evaluate the water demand of young cocoa plants grown in the field, determining ETc and Kc during the growth and production cycle. In the experimental area of 4868.9 m² of the Post Graduate Program in Agricultural Engineering from the Universidade Federal do Recôncavo da Bahia in Cruz das Almas, 530 plants of the variety CCN 51 were transplanted, spaced three meters and irrigated by micro sprinkler system. Monthly, measurements of plant growth and leaf area and daily measurements of ETc and Kc were carried out in one plant grown in full sun within a weighing lysimeter supported by four load cells. ETc was determined by mass balance and Kc by the ratio of the ETc and reference evapotranspiration (ETo) calculated with the Penman-Monteith equation. The annual rate of ETc was 800.68 mm with a daily average of 3.8 mm and an average Kc of 0.92. The water demand for young cocoa plants, evaluated by means of ETc and Kc, showed how demanding the crop is in water, and in the stages of growth and physiological

maturation of the fruit, ETc was greater in relation to the phases of flowering, fruit development and fillings.

Keywords: *Theobroma cacao* L. Production technologies. Water demand.

INTRODUÇÃO

O Brasil, apesar de deter apenas 4,0% da produção mundial de cacau, se destaca em relação aos países da África, pelo aumento acentuado na produção de amêndoas, possuindo também disponibilidade de áreas para a expansão da cultura que, por sua vez, conta com manejo mais adequado (MODA; BOTEON; RIBEIRO; 2019). Além disso, é o único País com a cadeia produtiva completa (LEITE, 2018), em que a junção de todos os fatores, torna eles, uma grande potência para a produção de amêndoas, podendo chegar aos níveis de 1980, em que a cultura era muito lucrativa aos produtores.

Para alavancar a produtividade dos cacauais no Brasil, os cultivos a pleno sol, a utilização de genótipos mais produtivos e resistentes a pragas e doenças e ao próprio estresse hídrico e, principalmente, o incremento da irrigação são estratégias que, além de aumentar a produção, melhora a qualidade dos frutos (CUENCA; NAZÁRIO, 2004; CHEPOTE et al., 2005; CODEVASF, 2009), visto que as mudanças nos padrões de chuva e, principalmente, na sua distribuição podem reduzir a produção, a exemplo do ocorrido na Bahia, em consequência da estiagem que atingiu os produtores no ano de 2013 (MERCADO DO CACAU, 2016).

Nos cultivos tradicionais a produção de amêndoas secas é em média 0,550 t ha⁻¹ ano⁻¹, diferente dos cultivos com clones, a exemplo do CCN 51, que já alcança 2,0 t ha⁻¹ ano⁻¹ e 3,0 t ha⁻¹ ano⁻¹ no Equador e na Indonésia sob condições particulares de cultivo (FAO, 2010). Porém, os rendimentos não dependem somente da forma de cultivo solteiro ou consorciado, mas da disponibilidade de água e nutrientes e das próprias condições ambientais, das quais o fator que mais influencia a cultura é a chuva (WOOD, 1985), sendo suficiente entre 1.400 e 2.000 mm ano⁻¹, e abaixo de 1.200 mm reduz o crescimento e o rendimento, devido à limitação da umidade no solo (ALVIM, 1977).

Os pesquisadores Lahive; Hadley; Daymond (2019) reforçam que mais importante que a lâmina anual total precipitada é a sua distribuição,

principalmente quando se tem cultivos em diferentes tipos de solo, e que por sua vez apresentam propriedades de retenção de água diferentes, alterando a sensibilidade dos cacauzeiros ao déficit hídrico. Tudo isso ressalta a importância da irrigação suplementar nas áreas produtoras, mas para isso é extremamente importante conhecer a demanda hídrica da cultura, determinando a ET_c e o K_c , seja por métodos diretos ou indiretos.

Na literatura, é descrita a utilização de equações que estimam a ET_c utilizando conjuntos de dados meteorológicos; porém, eles superestimam os resultados, refletindo nos desperdícios de água e aumento nos custos de produção. Já a lisimetria de pesagem pode ser empregada como método padrão, inclusive na determinação do K_c (HOWELL; SCHNEIDER; JENSEN et al., 1991; CAVALCANTE JÚNIOR et al., 2013), desde que o sistema seja bem calibrado.

O uso real da água pelo cacau, com base no método do fluxo de seiva, até então sugere taxas de $ET_c < 2,0 \text{ mm dia}^{-1}$ que, para uma cultura com um dossel completo, pareceria baixo, sendo o valor de K_c de apenas 0,3 (CARR; LOCKWOOD, 2011), muito menor que o valor teórico recomendado pela FAO-56 (ALLEN et al., 1998) para plantas de cacau ou qualquer cultura com cobertura total do solo.

Além desses, registros mais atuais da demanda hídrica do cacau foram apresentados por Hafif (2017) na Indonésia, em que o K_c variou de 0,83 a 0,93 nas fases da cultura, e no Brasil por Leite (2013), que obteve um K_c médio de 0,9 para plantas jovens de cacau, irrigadas por gotejamento em consórcio com bananeira e pau-brasil, em que a lâmina média evapotranspirada pela cultura foi de $3,5 \text{ mm dia}^{-1}$.

Portanto, o conhecimento da demanda hídrica do cacau permitirá que o produtor faça uso mais eficiente da água de irrigação, manejando-a de forma adequada, pois os processos fisiológicos da cultura são afetados tanto pela ausência do fator hídrico no solo (MACHADO; ALVIM, 1981; ALVIM, 2000) como por seu alagamento, resultando em baixos rendimentos dos frutos, por reduzir a área foliar, a condutância estomática e a taxa de fotossíntese (ALMEIDA; VALLE, 2007).

Diante da importância do fator hídrico no estabelecimento, desenvolvimento e produção de cacauzeiros, por sua sensibilidade ao estresse hídrico, objetivou-se no presente trabalho avaliar a demanda hídrica de plantas de

cacau cultivadas em campo, determinando a ET_c e o K_c durante o ciclo de crescimento e produção.

MATERIAL E METODOS

A pesquisa foi conduzida em uma área experimental de 4.868,9 m² do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, em Cruz das Almas, Bahia, Brasil, localizada a 12° 39' 11" S e 39° 7' 19" W, e que, segundo Köppen-Geiger (KOTTEK et al., 2006), encontra-se sob clima tropical quente úmido, com pluviosidade média anual de 1.170 mm, umidade relativa do ar média em torno de 80,0%, temperatura média anual de 24,5°C e velocidade do vento média de 3,1 m s⁻¹ (GUIMARÃES et al., 2016). O solo da área experimental é um Latossolo Amarelo Distrocoeso, de textura franco-arenosa (SANTOS et al., 2018), correspondente a um Typic Haplustox (SOIL SURVEY STAFF, 2014) e Ferralsol (FAO, 2015).

O pomar foi formado por 530 plantas do genótipo CCN 51, com espaçamento de três metros entre plantas. Elas foram adquiridas no Instituto Biofábrica de Cacau, Ilhéus, BA, as quais foram transferidas para sacos de polietileno de 30 x 20 x 0,13 cm e, após três meses de permanência em casa de vegetação, foram transplantadas na área experimental, no dia 17 de outubro de 2016, e conduzidas à sombra até o estabelecimento das plantas no dia 30 de maio e, logo após, a pleno sol (Figura 10).

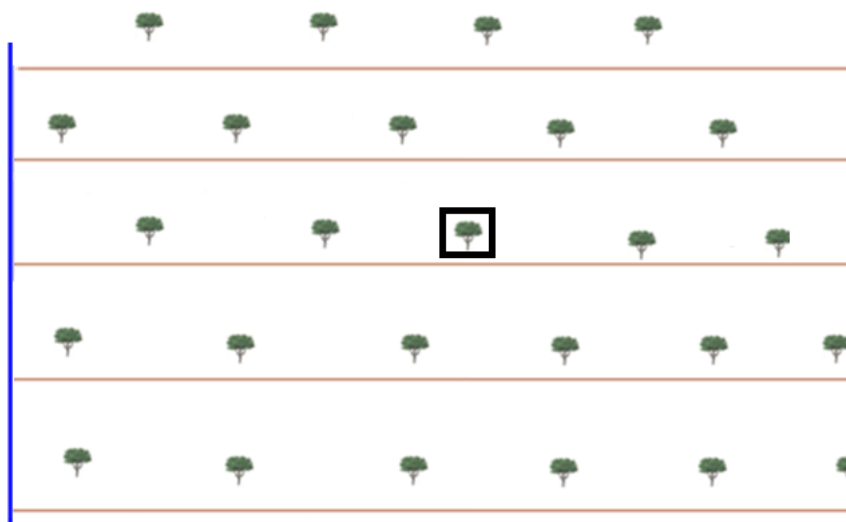


Figura 10. Croqui da área experimental.

A evapotranspiração da cultura foi determinada por meio de um lisímetro de pesagem instalado no centro da área (ver capítulo 1) e, após sua calibração, a massa do conjunto foi obtida utilizando a equação 05.

$$Kg = 524,69585mV - 2.459,94343 \quad (05)$$

O Kc da cultura foi determinado por meio da relação entre a ETc obtida no lisímetro de pesagem e a ETo estimada pela equação de Penman-Monteith, seguindo a metodologia proposta por Doorenbos e Kassam (1979), por meio da equação 05:

$$Kc = \frac{ETc}{ETo} \quad (06)$$

em que: ETc é a evapotranspiração da cultura, mm dia⁻¹; ETo é a evapotranspiração de referência, mm dia⁻¹

As variáveis meteorológicas temperatura e umidade relativa do ar foram mensuradas por um termohigrógrafo, e a velocidade do vento por um anemômetro e a radiação solar global, sendo todas obtidas da estação automática do Centro Nacional de Pesquisa de Mandioca e Fruticultura Tropical (EMBRAPA) em Cruz das Almas, BA. Já a precipitação pluviométrica foi registrada por meio de um pluviômetro tipo paulista instalado na área experimental.

Mensalmente foram realizadas medidas de crescimento na planta: diâmetro do caule, altura da planta e sua área foliar. As medidas foram realizadas com o auxílio de uma fita métrica para altura de planta e diâmetro do caule. A estimativa da área foliar foi realizada utilizando a equação 07.

$$AF = 0,670 L C \quad (07)$$

em que, AF representa a área foliar, L é a largura da folha e C é o comprimento da folha.

Adotou-se uma amostragem com 15,0% do total de folhas que constava na planta. A estimativa foi realizada com folhas íntegras, homogêneas e sem deformações de forma aleatória, sendo feita manualmente com o auxílio de uma

régua milimetrada, seguindo o método de medição das dimensões foliares, que se dá medindo o maior comprimento e a maior largura de cada folha, desconsiderado o pecíolo.

Os dados foram multiplicados pelo fator de correção $K= 0,670$ obtidos em Santos et al. (2014), que comparou métodos de estimativa da área foliar de cinco genótipos de cacau (plantas adultas) entre os quais encontra-se o CCN 51. Estatisticamente, os autores não encontraram diferenças significativas entre os métodos de estimativa, concluindo que o método de medição das dimensões foliares foi eficiente, recomendando apenas que utilizassem demais fatores de ajuste, em que para o CCN 51 foi o citado acima.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 1 são apresentados os valores totais mensais de precipitação e valores médios da temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação global e evaporação do tanque classe A em um ano do ciclo produtivo de plantas jovem de cacau.

Tabela 1. Valores totais de precipitação e valores médios da demanda evaporativa do ar durante um ano do ciclo de produção de cacau jovem irrigado por micro aspersão no sistema de monocultivo a pleno sol em Cruz das Almas, Bahia, Brasil.

Meses	Pp	Tm	Ur	U ₂	Rg	EVCA
	Mm	°C	%	m s ⁻¹	MJ m ⁻² dia ⁻¹	mm dia ⁻¹
	Total			Média		
Janeiro	6,2	25,9	71,3	2,9	22,1	8,0
Fevereiro	20,3	25,9	73,4	2,8	20,4	6,8
Março	64,7	25,9	74,7	2,7	21,2	6,2
Abril	122,6	24,8	82,3	2,5	20,5	4,5
Mai	110,1	23,2	86,2	2,4	14,1	4,1
Junho	130,8	22,4	86,5	2,4	15,1	3,5
Julho	170,2	20,5	87,0	3,2	16,2	3,6
Agosto	112,1	21,1	83,7	2,6	17,8	3,7
Setembro	105,3	21,5	84,0	3,0	19,5	4,7
Outubro	20,9	23,2	80,1	2,7	24,6	5,9
Novembro	40,7	24,5	79,5	2,4	22,5	4,7
Dezembro	4,6	25,6	76,5	2,5	24,6	6,1
Total	909,5	-	-	-	-	-
Média	75,71	23,9		2,6	-	-

Pp, precipitação pluviométrica; Tm, temperatura média do ar; Ur, umidade relativa do ar; U₂, velocidade do vento; Rg, radiação global; EVCA, evaporação do tanque classe A.

Observam-se uma menor demanda atmosférica entre os meses de abril e setembro em consequência dos eventos de precipitação, por isso, nesse período os valores de T_m e R_g foram menores e U_r maior em relação aos meses de janeiro a março e de outubro a dezembro, em que a demanda evaporativa do ar foi maior e com volumes precipitados menores e menos intensos.

A demanda atmosférica por influir na demanda hídrica de culturas agrícolas, acabou provocando redução das lâminas evapotranspiradas pela cultura do cacau (Tabela 2). Nesse período, além da evaporação do solo ser menor, devido a baixas temperaturas, as plantas também tendem a reduzir sua transpiração em função do aumento da umidade relativa do ar, provocando valores menores de evapotranspiração.

Tabela 2. Valores totais, médio, máximos e mínimos da evapotranspiração da cultura do cacau e da evapotranspiração de referência durante um ano do ciclo de produção da cultura irrigada por microaspersão no sistema de monocultivo a pleno sol em Cruz das Almas, Bahia, Brasil.

Meses	ETc				ETo			
	Total	Méd	Máx	Mín	Total	Méd	Máx	Mín
Janeiro	77,80	4,09	5,20	3,27	94,36	4,97	5,51	3,96
Fevereiro	76,92	4,27	5,57	2,02	86,17	4,79	5,63	3,60
Março	68,25	4,01	5,72	2,84	75,58	4,45	5,29	3,03
Abril	62,90	3,56	4,91	2,06	69,66	3,96	5,38	2,58
Maio	30,74	3,07	3,99	2,15	29,90	2,99	3,74	2,09
Junho	24,48	2,45	3,95	1,31	27,45	2,75	3,12	2,43
Julho	34,90	2,49	4,00	0,95	39,36	2,81	4,32	0,55
Agosto	60,18	3,01	3,98	2,09	65,77	3,29	3,96	2,63
Setembro	70,18	3,51	5,37	2,07	72,40	3,62	5,34	2,42
Outubro	93,51	4,45	6,59	3,03	98,13	4,67	6,64	3,50
Novembro	93,64	4,46	6,50	2,37	97,41	4,64	6,36	2,67
Dezembro	107,19	4,66	6,39	2,39	119,03	5,18	7,04	3,94
C.Planta	285,87	3,97	5,72	2,02	325,77	4,52	5,63	2,58
Floração	41,33	2,76	3,99	1,79	43,76	2,92	3,74	2,09
D.Fruto	179,14	3,04	5,37	0,95	191,12	3,24	5,34	1,55
M.F.Fruto	294,34	4,53	6,59	2,37	314,57	4,84	7,04	2,67
Total	800,68	-	-	-	875,22	-	-	-
Média	66,72	3,79	-	-	72,94	4,15	-	-

ETc, evapotranspiração da cultura; ETo, evapotranspiração de referência; Méd, média; Máx, máximo; Mín, mínimo; C.Planta, crescimento da planta; D.Fruto, desenvolvimento do fruto; M.F.Fruto, maturação fisiológica do fruto.

Os valores de ET_c apresentados (Tabela 2) também mostrou que a demanda atmosférica influenciou na demanda hídrica da cultura durante os estádios de crescimento da cultura, uma vez que a ET_c tende a ET_o . As perdas de água por evapotranspiração da cultura, mensuradas no lisímetro de pesagem durante todo o período de avaliação, somaram 800,68 mm, com média mensal de 66,72 mm e diária de 3,8 mm (Tabela 2).

Os resultados se assemelham aos obtidos por Leite (2013), que ao avaliar o consumo hídrico de plantas jovens de cacau irrigadas por gotejamento em consórcio com bananeira e pau-brasil, computou pelo balanço hídrico de campo utilizando tensiômetros, lâmina média diária de 3,5 mm. Porém, a lâmina total evapotranspirada pela cultura no presente estudo foi superior à obtida pelo pesquisador, de 310,6 mm.

Na tabela 2, foi observado nas fases inicial (janeiro a abril), média (maio a setembro) e final (outubro a dezembro), variação da demanda hídrica da cultura ocorrendo também em função da própria fenologia da cultura, pois devido ao desenvolvimento das plantas, as lâminas evapotranspiradas tendem a aumentar em resposta ao aumento do consumo de água pelas plantas, mostrando que as variações da ET_c do cacau ocorrem também em função do seu desenvolvimento, já que os processos fisiológicos de crescimento e produção são fatores que interferem na demanda hídrica das culturas agrícolas.

Durante o período de avaliação, a evapotranspiração da cultura variou de 3,97 mm, no início das coletas de dados em 01 de janeiro (79 dias após o transplante) de 2017 a 4,53 mm no final das avaliações, dia 31 de dezembro (443 dias após o transplante) de 2017 (Figura 11).

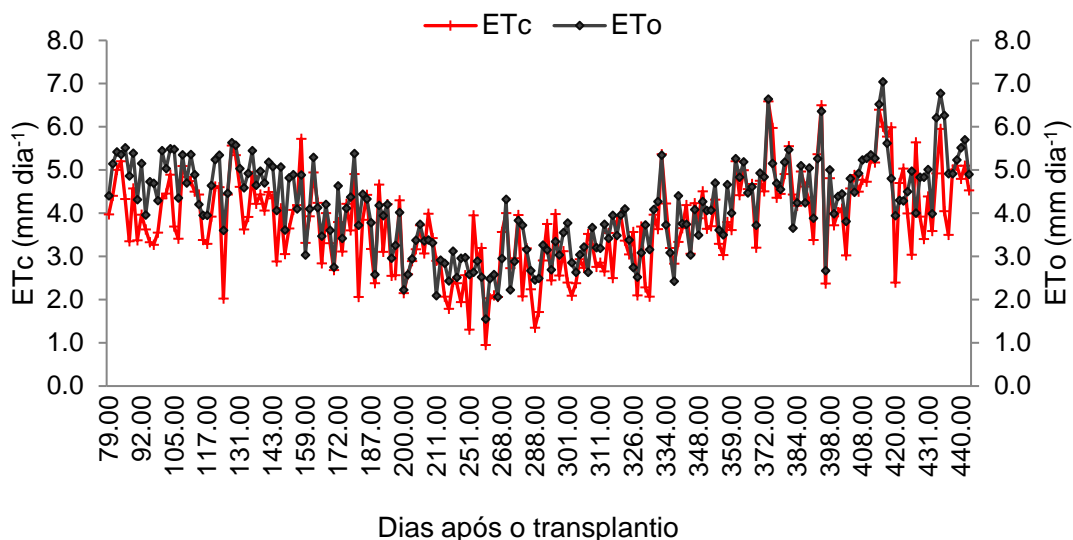


Figura 11. Evapotranspiração de plantas jovens de cacau e evapotranspiração de referência no ano de 2017.

A menor lâmina evapotranspirada durante todo o período de avaliação foi de 0,95 mm, inferior à obtida por Leite (2013), que foi de 2,0 mm. Já a maior lâmina evapotranspirada de 6,6 mm na presente pesquisa se assemelha à obtida pelo autor que foi de 6,7 mm.

O menor valor da ETc diária durante todo o período de avaliação ocorreu no dia 03 de julho (262 DAT) (Figura 11), coincidindo com as menores temperaturas diárias de todo o período, que ocorreram nesse mesmo dia, com máxima de 19,3°C, mínima de 18,4°C e média 18,9°C (Figura 12B), além da radiação solar de 6,6 MJ m⁻² dia⁻¹, a menor durante todo o ciclo da cultura (Figura 12A). A ETc também foi menor nos dias em que a U_r (Figura 12C) e a U_2 (Figura 12D) foram menores em praticamente todo o período de avaliação.

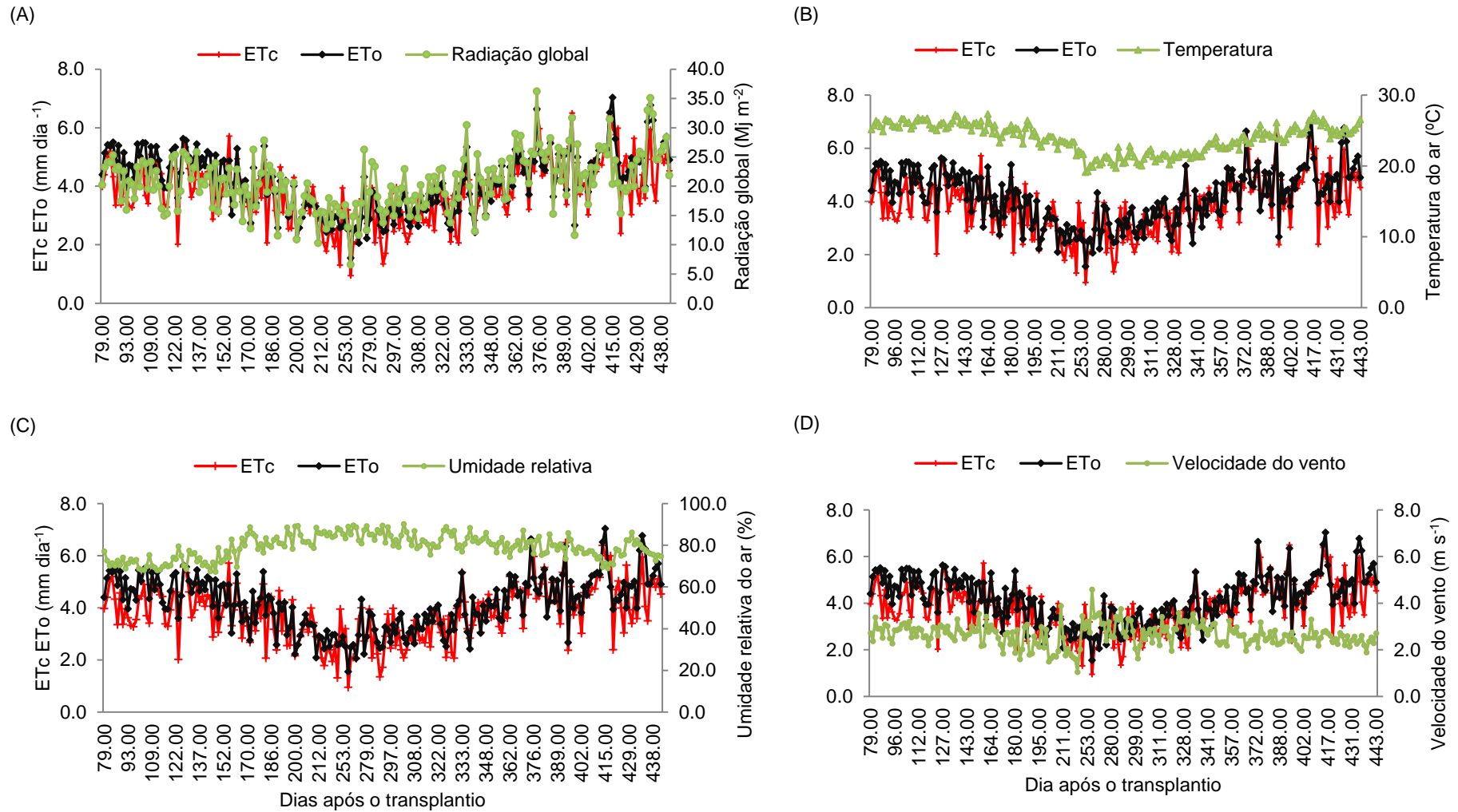


Figura 12. Demanda hídrica de cacaueiro irrigado e conduzido no sistema de monocultivo a pleno sol e demanda atmosfera no tempo.

Analisando os dados apresentados nas tabelas 1 e 2 e nas figuras 11 e 12, é possível inferir que a demanda hídrica da cultura sofre influência de fatores que ocorrem simultaneamente, como os meteorológicos e da própria cultura, já que a demanda atmosférica influem no desenvolvimento da cultura, que pode variar entre as fases da cultura durante o ciclo produtivo.

Foram observadas variações da ETc ocorrendo também em função do crescimento da planta em diâmetro do caule, altura e área foliar. Da fase de crescimento da planta à fase de maturação dos frutos, o diâmetro do caule do cacauzeiro, variou em média de 14,52 cm para 26,57 cm, apresentando taxa de crescimento absoluto total de 11,74 cm e uma média por fase de 3,91 cm (Tabela 3). A taxa de crescimento absoluto de 5,83 cm na fase de floração foi a maior, enquanto a menor de 2,88 cm, ocorreu na fase de desenvolvimento do fruto, os valores representam 38,07% e 18,85% do total durante o ciclo da cultura.

Tabela 3. Valores médios das variáveis nas fases de crescimento e produção da cultura do cacau para o ano de 2017.

Meses	Dc	T.C.A		Ap	T.C.A		Af	T.C.A	
	(cm)	(cm)	%	(m)	(m)	%	(m ²)	(m ²)	%
Janeiro	11,70	-		1,20			11,00		
Fevereiro	13,50	1,80	11,76	1,40	0,20	15,38	13,70	2,70	16,99
Março	15,40	1,90	12,42	1,60	0,20	15,38	16,00	2,30	14,48
Abril	17,50	2,10	13,73	1,78	0,18	13,85	18,20	2,20	13,85
Maio	19,80	2,30	15,03	1,86	0,08	6,15	16,77	-1,43	-8,98
Junho	20,90	1,10	7,19	1,97	0,11	8,46	14,79	-1,98	-12,47
Julho	22,00	1,10	7,19	2,00	0,03	2,31	16,00	1,21	7,60
Agosto	23,20	1,20	7,84	2,10	0,10	7,69	18,00	2,00	12,59
Setembro	24,50	1,30	8,50	2,25	0,15	11,54	22,00	4,00	25,18
Outubro	25,50	1,00	6,54	2,37	0,12	9,23	24,00	2,00	12,59
Novembro	26,30	0,80	5,23	2,43	0,06	4,62	25,70	1,70	10,70
Dezembro	27,00	0,70	4,58	2,50	0,07	5,38	26,89	1,19	7,48
C.Planta	14,53	-	-	1,50	-	-	18,90	-	-
Florecimento	20,35	5,83	38,07	1,92	0,42	32,31	19,10	0,20	1,12
D.Frutos	23,23	2,88	18,85	2,12	0,20	15,51	14,30	4,80	26,97
M.F.Frutos	26,27	3,03	19,83	2,43	0,32	24,36	27,10	12,80	71,91

Dc, diâmetro do caule; Ap, altura da planta; Af, área foliar; T.C.A, taxa de crescimento absoluto; C.Planta, crescimento da planta; D.Frutos, desenvolvimento do fruto; M.F.Fruto, maturação fisiológica do fruto.

Observa-se para todo o período de avaliação crescimento mensal em diâmetro do caule variando de 11,7 a 27 cm, apresentando taxa de crescimento absoluto total de 15,3 cm, taxa mínima de 0,7 cm no mês de dezembro e máxima de 2,3 no mês de maio, representando respectivamente 4,58% e 15,03% do total.

Os resultados estão relacionados com as épocas de avaliações e com o próprio desenvolvimento da cultura, em que a menor taxa ocorreu no mês de dezembro, época da colheita de frutos maduros, e a maior no mês de maio, período de floração das plantas.

Em geral, as taxas de crescimento absoluto apresentaram menores valores no período de maturação dos frutos, enquanto as maiores ocorreram na fase de crescimento. O decréscimo nas taxas de crescimento absoluto em diâmetro do caule durante o desenvolvimento dos frutos pode ter sofrido influência das variáveis meteorológicas locais, já tendo sido comprovado na literatura, que o excesso ou falta de água no solo, assim como variações de temperatura e radiação solar, afetam o crescimento de plantas de cacau e conseqüentemente sua evapotranspiração (ALMEIDA; VALLE, 2007).

Com relação à área foliar da cultura, nota-se que durante o experimento, o crescimento variou, sendo observado inicialmente um crescimento de 11 m² no mês de janeiro com reduções gradativas nos meses de maio e junho, voltando a ser crescentes a partir do mês de agosto e atingindo o valor máximo de 26,9 m² no mês de dezembro.

Do crescimento da planta à maturação do fruto ocorreu uma variação média na taxa de crescimento da área foliar de 18,9 m² a 27,1 m², apresentando o menor valor de 14,3 m² na fase de desenvolvimento do fruto que coincidiu com o período de chuvas. Nessa fase, em relação à fase anterior, a redução na taxa de crescimento foi de 26,97%.

De acordo com Almeida; Valle (2007), as plantas de cacau apresentam períodos de intensa emissão de folhas novas, alternando com períodos de repouso vegetativo e crescimento radicular, fazendo com que as taxas de crescimento alternem de crescentes para decrescentes durante o ciclo da cultura. Essa pode ser uma das possíveis explicações para os resultados observados na presente pesquisa, visto que as maiores taxas de crescimento absoluto em área foliar foram para os meses de fevereiro e setembro, sendo esses os meses do

ano em que as plantas emitem mais intensamente folhas novas, fato observado na presente pesquisa.

A variação dos valores de crescimento da área foliar do cacau também tem relação com o aumento no volume de chuva, pois, de acordo com Muller; Valle (2008), a área foliar de uma cultura possui relação direta com a genética de sua variedade, sendo influenciada por fatores ambientais.

A temperatura e a umidade relativa do ar também influenciaram nas taxas de crescimento e desenvolvimento das plantas, uma vez que as condições meteorológicas afetam tanto o crescimento vegetativo como o florescimento e área foliar da cultura, já tendo sido comprovado na literatura em trabalhos como o de Almeida; Valle (2007), que avaliaram o efeito dos processos bióticos e abióticos no crescimento e desenvolvimento de plantas de cacau, e por Fraga Júnior (2017) que observou reduções nas taxas de crescimento da área foliar de plantas de cacau cultivadas em ambiente com sombreamento de 38,0% em relação ao ambiente com 22,0%.

O autor explicou que o auto-sombreamento entre folhas no ambiente de maior redução da radiação, também provoca redução da taxa de crescimento em área foliar, por causar redução da transmissividade na copa da própria planta, reduzindo a capacidade de aproveitamento da radiação solar disponível. Todos esses fatores afetam a transpiração da cultura contribuindo para o aumento ou redução da evapotranspiração.

Na figura 13 é apresentada uma análise de regressão com os dados de ET_o e da relação da ET_c com a área foliar da cultura do cacau, a fim de expressar a relação do consumo hídrico da cultura com seu crescimento em área foliar em função da demanda atmosférica, sendo observada uma relação direta, indicando aumento da transpiração em função da demanda atmosférica e do crescimento em área foliar da cultura.

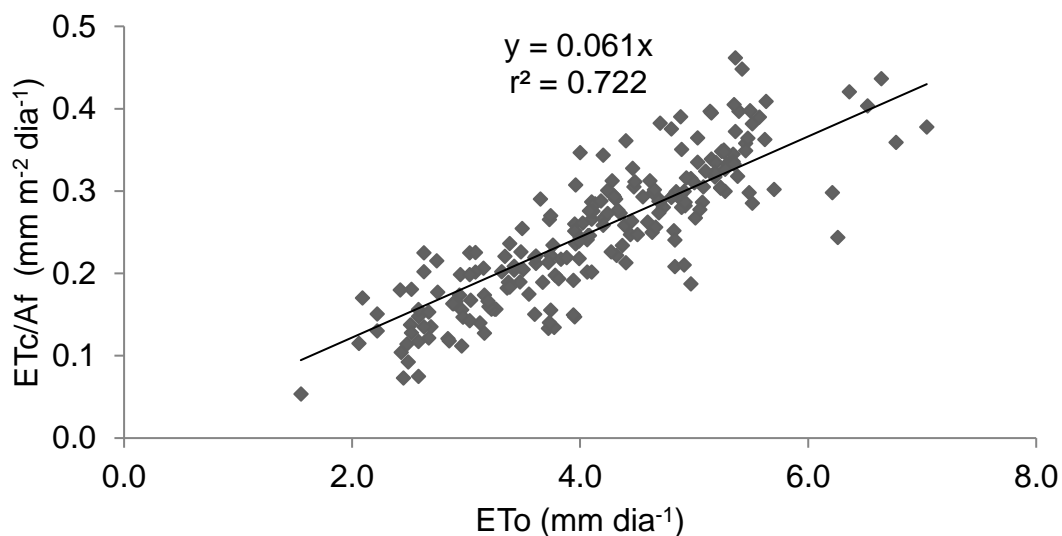


Figura 13. Área foliar do cacau em função da evapotranspiração de referência.

A análise de regressão apresentou um r^2 de 0,72, apesar das fontes de variação da ETc durante o período de avaliação, ocasionadas pelos eventos de irrigações freqüentes, que possibilitaram molhar toda a área do lisímetro e, consequentemente, aumentar a evaporação do solo. Mesmo assim, a relação entre a ETc do cacau e sua área foliar reforça o que já vem sendo citado no decorrer da apresentação dos resultados, que, além da demanda atmosférica, o próprio comportamento da cultura em seu ambiente de cultivo configuram em fatores que influem na ETc.

Os resultados corroboram com as observações de pesquisadores disponíveis na literatura, que dão uma indicação de que a demanda hídrica da cultura seja influenciada não só pela demanda atmosférica, mas também pelo próprio desenvolvimento da cultura que, por sua vez, também é afetado por ela, uma vez que os processos fisiológicos da cultura do cacau estão diretamente relacionados com as variáveis: temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar e a própria pluviosidade (ALMEIDA; VALLE, 2007).

Na tabela 4, são observados os valores de Kc do cacau durante o ciclo de crescimento e produção que, juntamente com a ETc, configuram a demanda hídrica da cultura (ALLEN et al., 1998). Os valores obtidos pela relação ETc e ETo variaram de 0,82 a 0,90 entre os meses de janeiro a dezembro, atingindo a maior média no mês de maio (1,04).

Tabela 4. Comportamento do coeficiente de cultura (Kc) obtidos através da relação ETc e ETo para plantas jovens de cacau no período de janeiro à dezembro de 2017.

Meses	Fases de Crescimento	Kc		
		Méd	Máx	Mín
Janeiro	Inicial	0,82	0,97	0,67
Fevereiro	Inicial	0,89	1,06	0,56
Março	Inicial	0,91	1,17	0,71
Abril	Inicial	0,90	1,11	0,55
Maio	Média	1,04	1,39	0,91
Junho	Média	0,90	1,50	0,51
Julho	Média	0,88	1,23	0,55
Agosto	Média	0,92	1,34	0,63
Setembro	Média	0,98	1,30	0,61
Outubro	Final	0,95	1,16	0,81
Novembro	Final	0,96	1,21	0,79
Dezembro	Final	0,90	1,41	0,57
Média	-	0,92	-	-
K _{c1}	Crescimento da planta	0,88	-	-
K _{c2}	Floração e desenvolvimento do fruto	0,94	-	-
K _{c3}	Maturação fisiológica e colheita	0,93	-	-
Média	-	0,91	-	-

Kc, coeficiente de cultivo do cacau na fases inicial (1) da cultura; média (2) e final (3)

Os valores de Kc observados para as fases de crescimento da cultura, inicial (0,88), média (0,94) e final (0,93) durante todo o período de avaliação, apresenta pouca variação, mantendo-se sempre próximo de 1,0. Porém, essa pequena variação implica em aumento ou redução da lâmina de água a ser aplicada, garantindo o manejo mais eficiente desse insumo. Contudo, observa-se que mesmo jovens, as plantas de cacau do presente estudo demandaram muita água em todas as fases de crescimento, apresentando kc médio de 0,92. Esses resultados se assemelham aos valores recomendados pela FAO (ALEN et al., 1998) e convertidos para regiões de clima subúmido a úmido (tropical) (ROGERS et al., 1983).

Os valores obtidos na presente pesquisa, também corroboram com os encontrado por Hafif (2017) na Indonésia, que analisou as características agroecológicas e as necessidades de irrigação suplementar para o crescimento e produção de plantas de cacau nas regiões Leste e Oeste da província de Lampung, obtendo valores de Kc entre 0,90 e 0,93 e de 0,90 e 0,87 nas fases

média e, de 0,92 e 0,91 e de 0,84 e 0,83 na fase final respectivamente nos três anos de avaliação em ambas as regiões e, no Brasil, com Leite (2013), que obteve um Kc médio de 0,9 para o cacauzeiro irrigado por gotejamento em consórcio com bananeira e pau-brasil no período de agosto/2012 a janeiro/2013.

A forte relação da ETc com a ETo resultando nos valores de Kc próximos de 1,0 durante todo o período experimental com exceção dos meses de janeiro e fevereiro, deve-se ao fato dessa cultura consumir muita água em todas as fases de crescimento, aliado a isso, a umidade no solo sempre próximo da capacidade de campo, permitiu que a planta expressasse seu potencial máximo de extração de água, visto não haver impedimento físico da matriz do solo.

Além disso, a demanda atmosférica no próprio local de cultivo, juntamente com a forma em que o pomar foi conduzido, contribuíram com o aumento da evaporação do solo, aumentando a evapotranspiração da cultura. Outra observação na presente pesquisa se deu nas fases da cultura, pois na forma de cultivo, pleno sol e irrigado, elas não ficam bem definidas, a partir da primeira produção, e isso, juntamente com a demanda atmosférica são responsáveis por tais resultados.

CONCLUSÕES

A demanda hídrica de plantas jovens de cacau, avaliada por meio da ETc e do Kc, mostrou o quanto exigente em água é essa cultura, em que nas fases de crescimento e maturação fisiológica do fruto, seu consumo em água foi maior em relação as fases de floração, desenvolvimento e enchimentos do fruto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. Irrigation and Drainage Paper: 56.

ALMEIDA, A. A. F.; VALLE, R. R. Ecophysiology of the cacao tree. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 4, p. 425-448, 2007.

ALVIM, P. T. **Fatores fisiológicos associados com a propagação bem sucedida de cacau por enraizamento de estacas**. In: PEREIRA, J. L. et al.

(eds). Atualização sobre produção massal de propágulos de cacau geneticamente melhorado. Atas, BA, Ilhéus. 1998, p. 90-91, 2000.

ALVIM, P. T (1977) Cacao. In: Ecophysiology of tropical crops. Academy Press, New York, pp 591–616.

CAMPECHE, L. F. S. M. **Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida "Tahiti" (*Citruslatifolia* Tan.)** – SP. 2002. 67 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) - ESALQ Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

CARR, M. K. V.; LOCKWOOD, G. The water relations and irrigation requirements of cocoa (*Theobroma cacao* L.): a review. **Experimental Agriculture**, v. 47, n. 4, p. 653-676, 2011.

CAVALCANTE JUNIOR, E. G. C. et al. Necessidade hídrica da cultura do girassol irrigado na chapada do Apodi. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 3, p. 261-267, 2013.

CHEPOTE, R. E. et al. 2005. **Recomendações de corretivos e fertilizantes na cultura do cacau no Sul da Bahia - 2ª aproximação**. Ilhéus, CEPLAC/CEPEC. 36p.

CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. **Cadeia produtiva de cacau: oportunidade de investimento em cacauicultura no Vale do São Francisco e do Parnaíba**. Centro de Conhecimento em Agronegócios. Brasília, DF: CODEVASF, 2009. 33 p.

CUENCA, M. A. G.; NAZÁRIO, C. C. **Importância Econômica e Evolução da Cultura do Cacau no Brasil e na Região dos Tabuleiros Costeiros da Bahia entre 1990 e 2002**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2004. 25 p.

DOOREMBOS, J.; KASSAM, A. H. Efectos del agua em rendimento de los cultivos. Roma: FAO, 1979. 212p. Riego y Drenage, 33

FAO - Food and Agricultural Organization. **Commodity Market Review**. Rome: Italy, 2010. 189 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome, 2015. 192p

FRAGA JUNIOR, L. S. **Relações hídricas do cacaueteiro: efeito da área foliar, potencial da água do solo e condições de sombreamento** - Ba. 2017. 61 f. Dissertação (Mestrado em engenharia agrícola) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Cruz das Almas Bahia, 2017.

GUIMARÃES, M. J. M. et al. Balanço hídrico para diferentes regimes pluviométricos na região de Cruz das Almas-BA. **Ciências Agrárias (Belém)**, v. 59, n. 3, p. 252-258, 2016.

HAFIF, B. Analisis agroekologi dan kebutuhan irigasi suplemen untuk tanaman kakao di Provinsi Lampung. **Journal of Industrial and Beverage Crops**, v. 4, n. 1, 2017.

HOWELL, A. T.; SCHNEIDER, D. A.; JENSEN, E. M. **History of lysimeter design and use of evapotranspiration measurements**. ALLEN, R. G. et al. (Ed.) *Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements*. New York: American Society of Civil Engineers, 1991, p. 1-9.

KOTTEK, M. et al. **World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated**, *Meteorologische Zeitschrift*, Germany, 2006, p. 259-263.

LAHIVE, F.; HADLEY, P.; DAYMOND, A. J. The physiological responses of cacao to the environment and the implications for climate change resilience. A review. **Agronomy for Sustainable Development**. v. 39, n. 5, 2019.

LEITE, L. R. C. (Org.). **Cacau e chocolate no Brasil: desafios na produção e comércio global**. Brasília: Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços - MDIC e Unesco, 2018. 128 p.

LEITE, M. S. B. **Consumo hídrico do cacaueteiro jovem irrigado por gotejamento em consórcio com bananeira e pau-brasil** - Ba. 2013. 68 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus Bahia, 2013.

MACHADO, R. C. R.; ALVIM, P. T. Effects of soil water deficit on the flushing, flowering and water status of cacao trees. *Revista Theobroma* 11:183-191, 1981.

MERCADO DO CACAU. **Seca reduz em até 40% safra temporã de cacau no sul da Bahia.** 12. jan. 2016. Disponível em: <<http://mercadodocacau.com/artigo/seca-reduz-em-ate-40-safra-tempora-de-cacau-no-sul-da-bahia>>. Acesso em: 29. nov, 2019.

MODA, L. R.; BOTEON, M.; RIBEIRO, R. G. Cenário econômico do mercado de cacau e chocolate: oportunidades para a cacauicultura brasileira. **Brazilian Journal of Development.** Curitiba, v. 5, n. 10, p. 21203 - 21225, 2019.

MULLER, M. W.; VALLE, R. R. Ecofisiologia do Cultivo do Cacaueiro. In: Raúl René Valle. **Ciência, tecnologia e Manejo do Cacaueiro.** Itabuna, v.1, p.17-41, 2008.

ROGERS, J. S.; ALLEN, L. H.; CALVERT, D. J. Evapotranspiration for humid regions: developing citrus grove, grass cover. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 26, n. 6, p. 1778–1783, 1983.

SANTOS, S. N. et al. Análise comparativa de métodos de determinação de área foliar em genótipos de cacau. **Bioscience Journal.**, Uberlandia, v. 30, supplement 1, p. 411-419, 2014.

SANTOS, H. G. DOS. et al. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 353p.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy.** 12. ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. 372 p. 2014.

WOOD, G. A. R (1985) Environment. In: Cacao. Longman Group Limited, London, pp 38–79. <https://doi.org/10.1002/9780470698983>.

CAPÍTULO 3

SPATIAL VARIABILITY OF THE SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SOIL IN COCOA FARMING IN RECÔNCAVO BAIANO³

³ Article published in the Journal Caatinga, vol.32 no.3 Mossoró July/Sept. 2019,
<https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n323rc>

SPATIAL VARIABILITY OF THE SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SOIL IN COCOA FARMING IN RECÔNCAVO BAIANO⁴

GERLANGE SOARES DA SILVA^{5*}, JUCICLÉIA SOARES DA SILVA⁶, FRANCISCO
ADRIANO DE CARVALHO PEREIRA², RODRIGO ALMEIDA SANTANA⁷, RAFAEL
SILVA FIRMO⁴, OSWALDO PALMA LOPES SOBRINHO⁸

ABSTRACT: Irrigated cocoa cultivation opened the way for production in Coastal Tablelands soils. However, in this region, the cohesive layer formed near the surface can be a limiting factor for production. The knowledge of physical soil water attributes enables the efficient irrigation management of cohesive soils. This study characterized and modeled the spatial variability of saturated hydraulic conductivity (K_0) in an Oxisol of the Recôncavo Baiano Coastal Tablelands. The soil sampling was performed as undisturbed structures from 50 spaced points in an 8.0 to 8.0 m area, at three different depths in the experimental area of the Universidade Federal do Recôncavo da Bahia in Cruz das Almas—BA cultivated with cocoa ('CCN 51'). In the laboratory, K_0 was determined by constant head permeameter method, and the pore size distribution was determined using the tension table and the soil density (Ds). Data were analyzed using descriptive statistics and geostatistics. On average, the K_0 values were 40.41, 26.49, and 37.82 mm h⁻¹ at the depths from 0.0–0.15 m, 0.15–0.30, and 0.30–0.45 m. The Gaussian model was the best fit to the K_0 data set. For soil class, the K_0 showed a strong spatial dependence due to their relationship with the physical properties of the soil, its use, and handling. Since an important attribute for the delimitation of homogeneous areas for specific site management purposes as well be considered.

Keywords: *Theobroma cacao* L. Precision agriculture. Geostatistics. Soil water physical attributes.

*Corresponding author

⁴Received for publication in 12/19/2018; accepted in 07/10/2019.

Extracted from the first author's doctoral thesis, funded by FAPESB.

⁵Postgraduate Program in Agricultural Engineering, Nucleus of Water and Soil Engineering, Rui Barbosa Street, 710 - Campus Universitário, CEP 44380-000, Cruz das Almas - BA, Brazil, e-mail: gerlangesoares@hotmail.com; fadriano64@gmail.com

⁶Brazilian Agricultural Research Corporation - Embrapa Semi-Arid, Highway BR-428, s/n km 152, CEP 56302970, Petrolina-PE, Brazil, e-mail: jucicleiass@gmail.com

⁷Center for Agrarian, Environmental and Biological Sciences, Federal University of Bahia Recôncavo - UFRB, Rua Rui Barbosa, 710 - Campus Universitário, CEP 44380-000, Cruz das Almas - BA, Brazil, e-mail: rodrigoufrb@hotmail.com; rafasfirmo@gmail.com

⁸Postgraduate Program in Agrarian Sciences, Agronomy, Hydraulics and Irrigation Laboratory, South Goiana Highway, km 1, Rural Zone, CEP 75901970, Rio Verde - GO, Brazil, e-mail: oswaldo-palma@hotmail.com

VARIABILIDADE ESPACIAL DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DO SOLO SOB CULTIVO DE CACAU NO RECÔNCAVO BAIANO

RESUMO: O cultivo de cacau irrigado abriu espaço para a produção em solos de Tabuleiros Costeiros. Porém, nesta região, a camada coesa formada próxima da superfície, pode ser um fator limitante para sua produção. O conhecimento dos atributos físico-hídricos do solo possibilitará um manejo eficiente da irrigação em solos coesos. Com isso, objetivou-se caracterizar e modelar a variabilidade espacial da condutividade hidráulica saturada em um Latossolo Amarelo Distrocoeso dos Tabuleiros Costeiros do Recôncavo Baiano. A amostragem de solo na estrutura indeformada foi realizada em 50 pontos espaçados de 8,0 em 8,0 m, em três diferentes profundidades na área experimental da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, em Cruz das Almas - BA, cultivada com cacau CCN 51. Determinou-se em laboratório a K_0 utilizando permeâmetro de carga constante, distribuição de poros utilizando mesa de tensão e a densidade do solo. Realizou-se análises descritiva e de geoestatística. Em média os valores da K_0 foram 40,41 mm h⁻¹, 26,49 mm h⁻¹ e 37,82 mm h⁻¹ nas profundidades 0,0-0,15 m, 0,15-0,30 m e 0,30-0,45 m. O modelo gaussiano foi o que melhor se ajustou ao conjunto de dados da K_0 . Para a classe de solo avaliada, a K_0 apresentou uma forte dependência espacial devido a sua relação com as propriedades físicas do solo, seu uso e manejo. Podendo assim, ser considerado um importante atributo para a delimitação de zonas homogêneas para fins de manejo sítio específicos.

Palavras-chave: *Theobroma cacao* L. Agricultura de precisão. Geoestatística. Atributos físico-hídricos do solo.

INTRODUCTION

Agricultural productivity has intensified in the geo-environmental units of the Coastal Tablelands due to its agricultural potential (LIRA et al., 2016) and the increase of irrigation techniques, which in turn also opens space for cocoa production.

The soils of Coastal Tablelands, although well structured, present a cohesive layer near their surface (0.30–0.70 m deep), which in turn can impair the production of various agricultural crops because of the high resistance soil penetration of roots when dry (RAMOS et al., 2013). In addition, this soil has temporarily waterlogged areas in the rainy season and dry areas in the dry season (LIMA et al., 2014).

The cohesive character, by directly to influence the development of the root system, ends up limiting the extraction of water and nutrients by plants and reduces soil aeration (REZENDE et al., 2002). This can be a limiting factor for growing cocoa plants that concentrate the effective root system in the first 0.30 m deep soil layers and density on the surface that modifies the soil water dynamic may compromise the growth of plants.

Under agricultural cultivation, soils undergo many disturbances, mainly due to management practices, such as excavation and leveling, that cause soil disturbance, reduce pore size, increase the density, and consequently modify the K_0 (MESQUITA; MORAES, 2004; ALMEIDA et al., 2017). Since the K_0 represents the ease with which the soil transmits water, it is influenced by the physical properties of the soil (GONÇALVES; LIBARDI, 2013).

Because of this, assessing the physical and water attributes, with respect to K_0 under the cocoa cultivation in Coastal Tablelands soils, allows the prediction of how the growing influences soil properties, assisting farmers in making decisions that ensure the sustainability of natural resources and avoiding the degradation of potentially productive areas (STEFANOSKI et al., 2013).

The K_0 can be determined under conditions of saturation and non-saturation of the soil, using laboratory and field methods; however, both have advantages and limitations. In the laboratory, there is more control of the measurement conditions; however, the representative area of the lower surface may not represent actual field conditions. Already in the field, disturbances promoted in the samples are reduced; however, the method is more complex, making it less feasible (MELO FILHO, 2002; IBRAHIM; ALIYU, 2016).

K_0 is an attribute whose variation occurs in both time and space, making it difficult to determine. Therefore, using geostatistical techniques is necessary of and enables the determination of the spatial dependence (BOTTEGA et al., 2013; CORADO NETO et al., 2015). Furthermore, Cajazeira and Assis Junior (2011) reported that such information can reduce errors in the sampling process and the measurement results help in choosing management that is efficient for agricultural soils.

Thus, it becomes important to determining the K_0 in soils under cocoa cultivation, as the results indicate whether the water available in the soil is enough to meet the water needs of the crop. In addition, the characterization of their essential variability is necessary to assist in the efficient management of soil and irrigation.

Given the above, the objective was to characterize and to model the spatial variability of saturated hydraulic conductivity in an Oxisol of the Coastal Tablelands under cacao culture in the Recôncavo Baiano.

MATERIAL AND METHODS

The experiment was conducted in the experimental area of the Graduate Program in Agricultural Engineering from the Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) in Cruz das Almas, Bahia, Brazil with geographic coordinates 12°40'12" S and 39°6'7" W, and altitude of 220 m.

According to the Köppen-Geiger classification (KOTTEK et al., 2006), the climate is Am, which is warm moist tropical, with the drier months from September to March and the period of highest rain from April to August. The average annual rainfall is 1,170 mm, with variations between 800 and 1,400 mm. The average relative humidity is 80.0%, the average annual temperature is around 24.5 °C, and the average wind speed is 3.1 m s⁻¹ (GUIMARÃES et al., 2016).

The soil in the experimental area was classified as *Latosolo Amarelo Distrocoeso*, with a sandy loam texture according to the Brazilian Soil Classification System (SANTOS et al., 2018) and, with a related classification in the Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014) Typic Haplustox and, at WRB/FAO (2015) Ferralsol, located in the geo-environmental unit of Coastal Tablelands and having as typical features, cohesive layers.

The history of use and soil management in the experimental area in the last 10 years included the cultivation of cassava, followed by cattle grazing on grass pasture. In 2015, the soil was plowed and corrected for the cultivation of banana and paricá, and the intercropping with cocoa crop cultivation 'CCN 51' began in 2016 and lasted until June 2017. After thinning the banana, the cocoa plants were grown in full sun in the central part of the area, and at the ends, intercropped with paricá plants.

The banana cutting was conducted during 2017, due to its regrowth, and all material was disposed on the ground. Furthermore, cocoa and paricá leaves often fall on the ground and remained there; therefore, the soil surface at the time of the experiment contains a significant layer of organic material that was formed during the development of crops, causing the soil restructuring.

The area was irrigated with micro sprinklers and a fertilizer application system to replenish essential nutrients to the crops. Fertilizer application was accomplished with a

mixture of potassium chloride, monoammonium phosphate (MAP) and urea four times a year. In addition, control was done twice a year, and when necessary, pruning of cocoa plants and phytosanitary control was conducted.

Sampling for the evaluation of soil water physical attributes occurred on the entire cultivated area with cocoa plants at 50 different points with spacing of 8.0 m between the scores (Figure 14) georeferenced with the GPS GARMIN in UTM coordinates, Horizontal Datum WGS 84, Zone 22 South. There were 150 samples collected undisturbed at depths of 0.0-0.15, 0.15–0.30, and 0.30–0.45 m with the aid of volumetric rings (98.0 cm³).

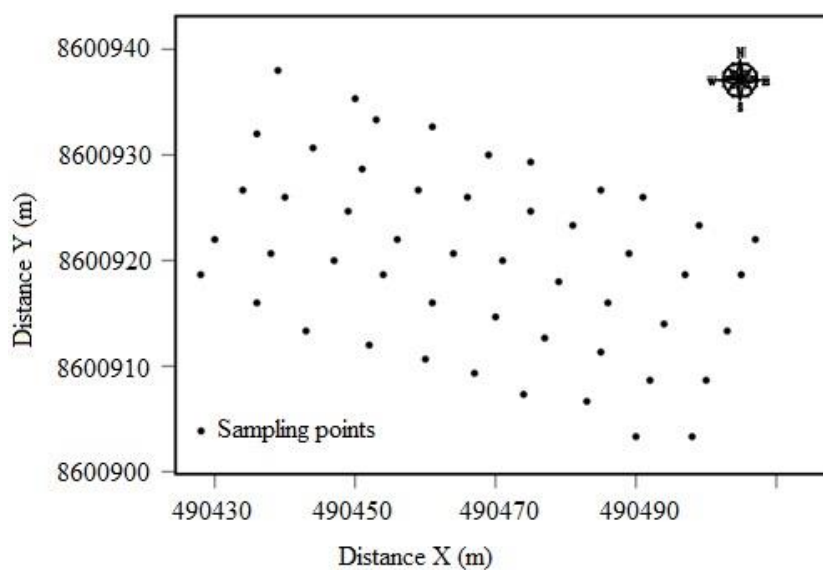


Figure 14. Distribution of sampling points in the study area.

Analyses for the determination of the attributes saturated hydraulic conductivity (K_0), soil density (D_s), macro (M_a), micro (m_i) and total porosity (P_t) were performed in the laboratory, after saturation of the water samples by twenty-four hours. For determining the K_0 , the constant head permeameter was used (YOUNGS, 1991), with the percolated water volumes in the interval of one hour measured in a beaker and held seven consecutive measurements, thereby obtaining the average value of the readings. The K_0 was calculated using Equation 08:

$$K_0 = \left(\frac{Q \times L}{A \times H \times t} \right) \quad (08)$$

where K_0 is the hydraulic conductivity in cm h⁻¹, Q is the drained volume in cm³, L is the height of soil coluna in cm, H is the height of unit in addition to the ground water column in cm, A is the area in cm² of the cylinder, and t is the time in hours.

Determination of Ma, Mi and Pt of the soil was carried out according to the methodology described in the manual of methods of physical analysis of the soil (TEIXEIRA et al., 2017). For the distribution of pore sizes, we used the tension table at 60.0 cm of water column. The volume of Ma was calculated as the difference between the measured mass of a saturated sample subjected to pressure of a 60.0 cm water column in relation to the volume of soil. Mi was the difference between the masses of the samples measured after the tension of a 60.0 cm water column and the samples dried at 105 °C. Pt represents the sum of Ma and Mi after the Ds was calculated by the difference between the masses of the samples after drying at 105 °C and the volume of soil contained in the ring.

We conducted descriptive analyses of the data obtaining maximum values, minimums, means, medians, standard deviations, skewness coefficients, kurtosis values, and coefficients of variation. The normality of the data was tested using the Kolmogorov-Smirnov (KS) test with 1.0% probability. For both analyses the Surfer 11.0 program was used (GOLDEN SOFTWARE, 2002), and it was used to generate spatial distribution maps of the attributes of the area.

The variability of K_0 had its classification based on the coefficient of variation values (CV) proposed by Warrick and Nielsen (1980), with values of low (CV < 12.0%), medium (CV 12.0–62.0%), and high (CV > 62.0%).

After descriptive analysis verified the spatial dependence of the data using geostatistical techniques (ROBERTSON, 1998; VIEIRA, 2000), the adjustment of semivariograms occurred when semi variance γ (h) was used to calculate the spatial correlation between local neighbors by Equation (09):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (09)$$

where N (H) is the number of experimental observations pairs of Z (x) and Z (x + h) separated by a distance h.

The semivariograms were obtained and adjusted according to the criteria and procedures described by Vieira et al. (1983) using the program GS⁺. The set of mathematical models and definition the parameters for semivariograms include: a) nugget effect (C_0), which is the value of γ when h = 0; b) extent of the spatial dependency (a), which is the distance where γ (h) remains approximately constant, after increasing with the

increase of h ; and c) threshold ($C_0 + C_1$), which is the value of $\gamma(h)$ from the scope and approaches the variance of the data.

The spatial variation of the K_0 structure was represented by the Spherical, Gaussian and exponential mathematical models tested by means of equations (10), (11) and (12), respectively, after obtaining the semivariograms.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1.5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad 0 < h \leq a; \quad \gamma(h) = C_0 + C_1 \quad h > a \quad 10$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp^{-\left(\frac{h^2}{a^2}\right)} \right] \quad h \neq 0 \quad 11$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp^{-\left(\frac{h}{a}\right)} \right] \quad h \neq 0 \quad 12$$

A cross-validation of the semivariograms was carried out in the GS^+ program, which applied the least squares method for the settings of the models and used the following criteria for selecting models: i) the coefficient of determination (R^2), which recalling the concept regression analysis, is a ratio of the sum of squares due to the adjusted model and the total sum of squares (measures the variation in the data due to the adjusted model to the total variation of the data), and the closer the unit is the R^2 value the better the adjusted model and ii) the waste sum of squares (RSS)– the lower this value is, the better the semivariogram model is. The GS^+ uses these results for the model selection, while using combinations of model parameters, and minimizing this sum of squares of waste.

The spatial dependence index (IDE), determined according CAMBARDELLA et al. (1994), is the proportion in percent of the nugget effect (C_0) in relation to the level ($C_0 + C$), and it was calculated according to $[C_0/(C_0 + C)]$. The spatial dependence was classified as strong when the ratio is $IDE \leq 25.0\%$, moderate if IDE is $25.0\%–75.0\%$ and weak IDE when $75.0\%–100.0\%$, and classified as independent when the distribution is random, and the ratio is equal to 100.0% .

RESULTS AND DISCUSSION

Further K_0 values were observed in the layer $0.0–0.15$ m (Table 5) in relation to the layers $0.15–0.30$ m and $0.30–0.45$ m, having an inversion in the distribution of pores and D_s .

Tabela 5. Parameters of descriptive analysis of physical soil water attributes in cocoa cultivation in the Recôncavo Baiano, saturated hydraulic conductivity (K_0), soil density (Ds), macro (Ma), micro (mi) and total porosity (Pt).

Attributes	Depth 0.0- 0.15 m											
	Average	Median	Maximum	Minimum	1st Quartile	3rd Quartile	Variance	SD	CV (%)	As	Kt	KS
K_0 (mm h ⁻¹)	40.4	28.4	124.8	1.4	17.59	53.49	951.3	30.8	76.33	1.16	0.67	0.23
Ds (g cm ⁻³)	1.8	1.81	2	1.7	1.77	1.87	0.01	0.07	4.11	0.19	0.25	0.23
Ma (m ³ m ⁻³)	0.19	0.19	0.34	0.1	0.14	0.23	0	0.05	28.42	0.47	-0.4	0.23
Mi (m ³ m ⁻³)	0.22	0.22	0.26	0.2	0.21	0.23	0	0.02	7.85	0.06	-0.6	0.23
Pt (m ³ m ⁻³)	0.41	0.41	0.56	0.3	0.38	0.43	0	0.05	11.64	0.74	0.42	0.23
Depth 0.15-0.30												
K_0 (mm h ⁻¹)	26.49	21.61	98.94	1.4	12.75	35.11	394.51	19.9	74.99	1.43	2.54	0.23
Ds (g cm ⁻³)	1.78	1.79	1.92	1.6	1.75	1.83	0	0.06	3.63	-0.02	-0.33	0.23
Ma (m ³ m ⁻³)	0.2	0.19	0.31	0.1	0.15	0.24	0	0.06	30.09	0.19	-1	0.23
Mi (m ³ m ⁻³)	0.23	0.23	0.27	0.2	0.21	0.24	0	0.06	30.09	-0.09	-0.64	0.23
Pt (m ³ m ⁻³)	0.42	0.42	0.51	0.3	0.39	0.46	0	0.04	10.13	0.21	-0.85	0.23
Depth 0.30-0.45 m												
K_0 (mm h ⁻¹)	37.82	29.47	110.1	2.3	15.37	59.57	811.49	28.5	75.32	0.89	-0	0.23
Ds (g cm ⁻³)	1.74	1.74	2	1.3	1.67	1.8	0.01	0.12	6.8	-1.05	4.74	0.23
Ma (m ³ m ⁻³)	0.2	0.21	0.3	0.1	0.15	0.24	0	0.06	29.95	-0.08	-1.05	0.23
Mi (m ³ m ⁻³)	0.24	0.23	0.3	0.2	0.22	0.25	0	0.02	9.88	0.84	0.68	0.23
Pt (m ³ m ⁻³)	0.43	0.43	0.52	0.4	0.39	0.47	0	0.05	10.91	0.22	-1.19	0.23

* SD Standard Deviation; CV = Coefficient of Variation; As = Asymmetry; Kt = Kurtosis; KS = Kolmogorov-Smirnov.

The results observed for K_0 as well as D_s and pore size distribution can be related to the class of soil, since Oxisols are one of the predominant groups in Coastal Tablelands. These soils generally have horizontal cohesive layers near the soil surface, which may have formed both naturally and by the history of land use in the area. This land use includes the cultivation of plants and grazing animals, and the use of machines in the preparation of the land, thus decreasing the K_0 and the volume of M_a , as well as increasing D_s , and likely forming layers of compacted soils.

The results observed for K_0 at certain depths may also be related to some factors that occur in the field and that were observed at the time of sampling. These include a high contribution of organic matter in the surface layer, one of the main components of the soil, which works to improve the structure influencing the hydraulic properties and translocation clay forming very hard layers at some depths, including at the sampled points, and the distribution of roots, which can also justify high values of D_s .

According to the relationship between the values of K_0 and other attributes, there is an inversion, where the most compacted layer had the highest average and less compacted had a lower average K_0 . This is unlikely, since hydraulic conductivity is considered the quantification of the ground water flow and is directly related to the ability to drive the ground water, thus having the largest capacity at the least compacted soil. However, this paradoxical phenomenon can be explained by the factor that stands out for getting a good infiltration rate, which is the continuity of the pores in the soil, as stated by Costa et al. (2016). Lower porosity values can be found suitable, if due to good connectivity between the pores, this is not restrictive and there may be a good conduction of water.

The observed results are in agreement with Almeida et al. (2017), who characterized the spatial variability of a saturated hydraulic conductivity soil Oxisol in the Municipality of Cruz das Almas, Bahia. They are also in agreement with Guimarães et al. (2016) who evaluated the spatial variability of soil physical attributes for Oxisol, and Ultisol and Inceptisols areas used for pasture. Kruger et al. (2016), when evaluating the spatial variability of physical soil water attributes in a small basin in southern Brazil, attributed this to several factors that occur at the soil surface. These included the presence of roots and cracking caused by animals (worms or ants and beetles), which in turn ended up influencing the values of K_0 , resulting in a tendency of overestimation.

The observed variation coefficients K_0 : 76.0% at a depth of 0.0–0.15 m and 75.0% at depths of 0.15–0.30 m and 0.30–0.45 m agree with most of studies that showed the heterogeneity of this attribute. Moreover, its variability ranked high according to the

classification proposed by Warrick; Nielsen (1980) and may be related to the average variability observed K_0 through their variation coefficients. This is one of the main attributes of the soil whose variability implies the variability of K_0 at nearby locations and depths observed also through the semivariogram analysis parameters. These are shown in Table 5, which shows the degree of spatial dependence in the area in addition to the spatial maps of isolines where their distribution in the area is visible (Figure 15).

Tabela 6. Analysis parameters of semivariographic values of the saturated hydraulic conductivity under cocoa cultivation in Recôncavo Baiano.

Depth	C_0	$C_0 + C_1$	A_0 (m)	IDE (%)	ranking	Model	R^2
0.0-0.15 m	-	-	-	-	-	EPP	-
0,15-0.30 m	209.3	418.7	13.33	21.71	Strong	Gaussian	0.78
0.30-0.45 m	100.0	737.8	5.35	13.55	Strong	Gaussian	0.84

* Effect nugget C_0 , $C_0 + C_1$ porch, A_0 -range, IDE- Spatial dependence index, coefficient of determination R^2 , EPP - Pure nuggeteffect.

For semivariogram data K_0 of 0–0.15 m in no setting a theoretical model for having the attribute pure nugget effect (EPP), spatial dependence was not observed, and therefore their variability cannot be explained in because of its sampling distance (SOUZA et al., 2006) and as little as possible is the setting of a theoretical model of semivariogram. Already in the depths of 0.15–0.30 and 0.30–0.45 m following the classification proposed by Cambardella et al. (1994), K_0 showed strong spatial dependence presenting a better fit of the data set as a Gaussian model. The results indicate that, even in a small area, there can be heterogeneity of its attributes, ranging from local neighbors and depth. This emphasizes the importance of evaluating the variability of K_0 using techniques such as geostatistics in which spatial maps (Figure 15) best represent the reality, making the information relevant to sustainable land use and its management practices, especially irrigation management.

Spatial variability was observed in that K_0 in subsurface soil layers occurred in the same spatial pattern obtained from contour maps (Figure 15). Although the degree of spatial dependence for K_0 classified according Cambardella et al. (1994) as strong for the of 0.15–0.30 and 0.30–0.45 m layers in the last layer can be viewed in spatial maps, a more significant distribution of spatial dependence of the attribute. The results show that the estimated K_0 to the surface considered for the delimitation of areas for homogeneous

differential management purposes in the field, since the area has variation in nearby locations being observed a range of 5.33 m in the last layer and which is inside the sampling grid that was 8.0 m to 8.0 m.

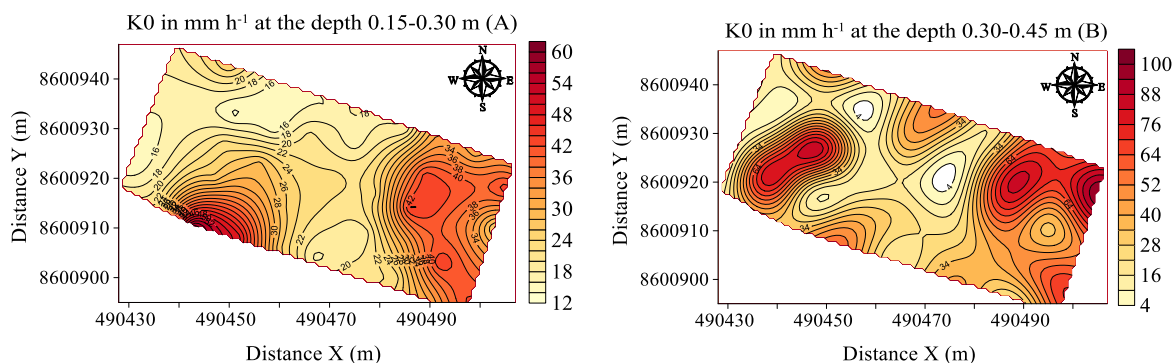


Figure 15. Map of isolines of the saturated hydraulic conductivity under cocoa cultivation in layers 0.15–0.30 m (A) and 0.30–0.45 m (B).

Almeida et al. (2017), characterizing the spatial variability of K_0 in a neighboring area with the same soil type, were also unable to detect spatial dependence of K_0 in the first layer of soil evaluated. It is therefore recommended to reduce the spacing in the next sampling or use an irregular mesh with varying distances to detect the spatial variability. The results also corroborated with Guimarães et al. (2016), Kruger et al. (2016), and Marques et al. (2008), who observed spatial dependence for K_0 at subsurface depths.

The distribution spatial of K_0 can be attributed to intrinsic or extrinsic factors. In the first case, these are predominately factors related to soil formation (mineralogy, grain size), while the second case, these are more related to management practices and land use, such as agricultural use, animal grazing, and the use of machines and tools to turn the soil, which modifies its structure and consequently its related attribute K_0 . Generally, a strong spatial dependence of soil properties is attributed to intrinsic factors and to extrinsic factors, a weak dependency (CAMBARDELLA et al., 1994; CARVALHO; TAKEDA; FREDDI, 2003).

Therefore, higher values K_0 at 0.0–0.15 m in the layer are associated with the form of use of the area, which in turn promotes soil aggregation. However, in layers of 0.15–0.30 m and 0.30–0.45 m, the changes in the physical properties of the soil may be related to the results, as shown by the strong spatial dependence on depth that did not occur on the surface. The results obtained were in accordance with Marques et al. (2008), who by analyzing the saturated hydraulic conductivity in a topo sequence with different vegetation types the Lower Amazon, found higher values of this attribute at the surface, citing that K_0

is more sensitive to changes in the physical properties of the soil and the relief position than to changes in vegetation. Almeida et al. (2017) also obtained the same behavior for the soil water physical attributes of the soil for the superficial and subsurface layers, confirming the relationship between the saturated hydraulic conductivity and the other attributes of the soil.

CONCLUSIONS

The Gaussian model was the best fit for the K_0 data set, which showed strong spatial dependence on the layers of 0.15–0.30 m and 0.30–0.45 m, which was detected in the 0.0–0.15 m layer. The statistical analysis and geostatistics showed a high spatial variability for the attribute in the area and depth, considering for the delimitation of homogeneous areas for specific site for management purposes, and the soil class indicates that values were consistent with the physical properties of the soil, as well as its use and management.

ACKNOWLEDGMENTS

We wish to acknowledge the Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia-FAPESB for granting a Doctoral Scholarship, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES, for supporting research, the Postgraduate Program in Agricultural Engineering, and the laboratory technicians of Physical Analysis in the Postgraduate Program in Soils and Ecosystem Quality of the Universidade Federal do Recôncavo da Bahia-UFRB.

REFERENCES

- ALMEIDA, K. S. S. A. et al. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em Latossolo Amarelo Distrocoeso, no município de Cruz das Almas. **Irriga, Botucatu**, v. 22, n. 2, p. 259-274, 2017.
- BOTTEGA, E. L. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 695-703, 2003.

CAJAZEIRA, J. P.; ASSIS JÚNIOR, R. N. Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um Argissolo no Estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 2, p. 258-267, 2011.

CORADO NETO, F. C. et al. Variabilidade espacial dos agregados e carbono orgânico total em Neossolo Litólico Eutrófico no município de Gilbués, PI. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 58, n. 1, p. 75-83, 2015.

COSTA, C. D. O. et al. Produção e deposição de sedimentos em uma sub-bacia hidrográfica com solos suscetíveis à erosão. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 2, p. 284-299, 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome, 2015. 192p

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer 11.0 - user's guide**. New York: Golden Software, 2002.

GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 37, n. 5 p. 1174-1184, 2013.

GUIMARÃES, M. J. M. et al. Balanço hídrico para diferentes regimes pluviométricos na região de Cruz das Almas-BA. **Revista de Ciências Agrárias (Belém)**, v. 59, n. 3, p. 252-258, 2016.

GUIMARÃES, W. D. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos ocupados por pastagens. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 2, p. 247-255, 2016.

IBRAHIM, M. M.; ALIYU, J. Comparison of methods for saturated hydraulic conductivity determination: field, laboratory and empirical measurements. **British Journal of Applied Science & Technology**. v. 15, n. 3, p. 1-8, 2016.

KOTTEK, M. et al. **World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated**, **Meteorologische Zeitschrift**, Germany, 2006, p. 259-263.

KRUGER, B. G. et al. Spatial variability of soil physical and hydraulic properties in the southern Brazil small watershed. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 49, p. 5036-5042, 2016.

LIMA, J. R. S. et al. Atributos físico-hídricos de um Latossolo Amarelo cultivado e sob mata nativa no Brejo Paraibano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife – PE, v. 9, n. 4, p. 599-605, 2014.

LIRA, R. A. et al. Uso agrícola e atributos físico-hídricos de solo coeso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 7, p. 2277-2289, 2016.

MARQUES, J. D. O. et al. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Acta Amazonas**, v. 38, n.2, p.193-206, 2008.

MELO FILHO, J. F. **Variabilidade dos parâmetros da equação da condutividade hidráulica em função da umidade de um Latossolo sob condições de campo**. 2002. 145 p. Tese (Doutorado em Agronomia, Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004.

RAMOS, B. Z. et al. Avaliação dos atributos físico-hídricos em um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes sistemas de manejo-Lavras / Minas Gerais / Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa. v. 36, n. 3, p. 440-446, 2013.

REZENDE, J. O. et al. **Citricultura nos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros; análise e sugestões**. Salvador, Secretaria da Agricultura, Irrigação e Reforma Agrária, 2002. 97p. (Série Estudos Agrícolas, 3).

ROBERTSON, G. P. **GS⁺ geostatistics for the environmental sciences: GS⁺ user's guide**. Plainwell: Gamma Design Software, 1998, 152 p.

SANTOS, H. G. DOS. et al. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 353p.

SOUZA, Z. M. et al. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e teor de água do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 128-134, 2006.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 12. ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. 372p. 2014.

STEFANOSKI, D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. rev. e ampl. - Brasília, DF: Embrapa, 573 p. 2017.

VIEIRA, S. R. et al. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, 352p.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. cap. 2, p. 319-344.

YOUNGS, E. G. Hydraulic conductivity of saturated soils. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. (Ed.). **Soil analysis: physical methods**. New York: Marcel Dekker, 1991. cap. 4, p. 161-207.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método lisimétrico, após sua calibração e análise de erros, mostrou-se eficaz na determinação direta da evapotranspiração da cultura do cacau em diferentes estádios da cultura, permitindo estudos das relações da sua demanda hídrica com as variáveis de crescimento e com a demanda atmosférica.

Porém, em dias com precipitação e drenagem, é recomendável retirar do computo da lâmina evapotranspirada pela cultura, pois não tem como separar as saídas de massa líquida por evapotranspiração e por drenagem.

A ET_c e o K_c em cada estágio da cultura do cacau, mostraram que essa cultura é muito exigente em água, e a adoção desses valores, permitem manejar de forma eficiente o uso da água de irrigação, evitando lâminas em excesso ou em déficit.

O cultivo do cacau clonal, conduzido em regime de irrigação e a pleno sol, favoreceu o desenvolvimento precoce da cultura, que produziu antes de um ano, após o transplante. Observou-se também, que após a primeira produção, praticamente não se consegue separar os estádios da cultura; dificultando separar os K_c por fase, sendo recomendável trabalhar com estratégias de manejo, que possibilite minimizar os efeitos do ambiente.

O solo avaliado, apesar de apresentar alta variabilidade espacial para a condutividade hidráulica saturada, não limitou o desenvolvimento da cultura, mais é recomendável que seu uso e manejo sejam feitos de forma a respeitar zonas específicas de manejo.